



**HAL**  
open science

**Le Bilan écologique. Mesurer la perturbation anthropogénique de l'Ecosphère et de la Biosphère (un bilan de l'Anthropocène). Caractériser les voies du Développement écologique des territoires.**

Richard Loiret

► **To cite this version:**

Richard Loiret. Le Bilan écologique. Mesurer la perturbation anthropogénique de l'Ecosphère et de la Biosphère (un bilan de l'Anthropocène). Caractériser les voies du Développement écologique des territoires.. Economies et finances. Université Paris Saclay (COMUE), 2016. Français. NNT : 2016SACLV001 . tel-01306180

**HAL Id: tel-01306180**

**<https://hal.science/tel-01306180>**

Submitted on 30 Apr 2017

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

NNT : 2016SACLV001

THESE DE DOCTORAT  
DE  
L'UNIVERSITE PARIS-SACLAY  
PREPAREE A  
L'UNIVERSITE VERSAILLES SAINT-QUENTIN EN YVELINES

ECOLE DOCTORALE N°578 : Sciences de l'homme et de la société

Discipline : Sciences Economiques

Spécialité : Economie Ecologique

Par

Mr **Richard Loiret**

---

Le **Bilan** *écologique*

Mesurer la perturbation anthropogénique  
de l'**Ecosphère** et de la **Biosphère**  
(Un **Bilan** de l'*Anthropocène*)

Caractériser les voies du **Développement** *écologique* des territoires

---

Présentée et soutenue publiquement à Rambouillet,

Bergerie nationale, le 27 janvier 2016

**Membres du Jury :**

Prof. Pierre IBISH, Centre for Economics and Ecosystem Management, Eberswalde, Allemagne (président du jury)

Prof. Peter HOBSON, Writtle College – University of Essex, Royaume-Uni (rapporteur)

Prof. Franck-Dominique VIVIEN, Université de Reims Champagne-Ardenne (rapporteur)

Dr. Jean-Marc DOUGUET, Université de Paris Saclay/Versailles Saint-Quentin-en-Yvelines (examinateur)

Prof. Sylvie FAUCHEUX, LIRSA, Conservatoire National des Arts et Métiers (examinateur)

Prof. Martin O'CONNOR, Université de Paris Saclay/Versailles Saint-Quentin-en-Yvelines (directeur de thèse)

*Il ne peut y avoir de solution à un problème  
qui vienne du système de pensée qui l'a fait naître.*

Albert Einstein

*Parce que la comptabilité nationale est fondée sur les transactions financières,  
elle compte pour rien la Nature à laquelle  
nous ne devons rien en fait de paiement financier,  
mais à laquelle nous devons tout en fait de moyens d'existence.*

Bertrand de Jouvenel, Arcadie, 1968



Cette thèse a été réalisée au sein du laboratoire REEDS (Recherches en Economie Ecologique et Développement Soutenable), de l'Université de Versailles-Saint-Quentin-En-Yvelines (UVSQ).

Elle a été partiellement financée par une convention partenariale de recherche établie entre le Parc Naturel Régional des Préalpes d'Azur (PNRPA, 06), l'Agence Régionale Pour l'Environnement (et l'Ecodéveloppement) de Provence-Alpes-Côte d'Azur (ARPE PACA), le laboratoire REEDS (UVSQ), et l'association Nord-Sud International (NSI).

L'UVSQ n'entend donner aucune approbation ni improbation aux opinions émises dans les thèses. Ces opinions doivent être considérées comme propres à leurs auteurs.

**Pour contacter l'auteur : [richardloiret@free.fr](mailto:richardloiret@free.fr)**

## Résumé

Ayant constaté l'échec de ses *Objectifs 2010 pour la biodiversité*, dont, entre autres, l'incapacité de l'*Empreinte écologique* à rendre compte de la biodiversité, la Convention sur la Diversité Biologique a adopté en 2011 *Les objectifs d'Aichi (2011-2020) pour la biodiversité*. Parmi ceux-ci les objectifs 1 et 2 concernent la prise de conscience des valeurs de la biodiversité, leur intégration dans les processus de planification nationaux et locaux de développement, et leur incorporation dans les comptabilités nationales. Ce en quoi ces objectifs de la CDB convergent désormais avec ceux des Nations Unies concernant le *Système de Comptabilité Economique et Environnementale* (SCEE).

La présente thèse s'inscrit dans ce cadre de questionnement unifié. Elle a le double objectif : (a) de rechercher, fonder et mettre au point une unité de mesure *biophysique* de la diversité biologique caractérisant tout aussi bien l'*ordre* naturel que le *désordre* anthropogénique, et (b) d'incorporer celle-ci dans un nouveau système de comptabilité *physique*, le **Bilan écologique**.

Celui-ci est susceptible de comparer, à toutes échelles territoriales, le **Passif écologique** des collectivités urbaines, vu comme le reflet *biophysique* de leur comptabilité *monétaire*, à l'**Actif écologique** de leurs espaces naturels, afin de révéler les relations de cause à effet, et de signifier les impacts cumulés de la perturbation anthropogénique sur l'Ecosphère et la Biosphère.

Il aurait ainsi vocation, à terme, à nous permettre de caractériser les voies d'un développement véritablement *écologique* des territoires.

## Abstract

Having noted the failure of its *2010 targets for biodiversity*, including, among others, the inability of the *Ecological Footprint* to account for biodiversity, the Convention on Biological Diversity adopted in 2011 *The 2011-2020 Aichi Targets for biodiversity*. Among these, objectives 1 and 2 concern awareness of the values of biodiversity, their integration into national and local development planning process, and their incorporation into national accounts. This how these objectives of the CBD converge now with those of the United Nations for the *System of Environmental-Economic Accounting* (SEEA).

This thesis lie within this unified questioning framework. It has the double purpose : (a) of searching for, founding and developing a *biophysical* measurement unit of biodiversity, characterizing just as well the natural *order* as the anthropogenic *disorder*, and (b) to incorporate it into a new *physical* accounting system, the *Ecological balance sheet*.

The latter is likely to compare, for all territorial scales, the *Ecological liability* of urban communities, seen as the *biophysical* reflection of their *monetary* accounting, to the *Ecological asset* of their natural spaces, in order to reveal the relationships of cause and effect, and to signify the cumulative impacts of anthropogenic disturbance on the Ecosphere and the Biosphere.

In the end, it would have so vocation to enable us to characterize the ways of a truly *ecological* development of the territories.

## Mots-clés

Actif écologique, Analyse Input/Output, Bilan écologique, Bilan thermodynamique d'un écosystème, Bilan stœchiométrique, Biodiversité, Biosphère, Biogéocénose, Comptes du Capital Naturel Ecosystémique, Cycles biogéochimiques, Distance à l'équilibre thermodynamique, Diversité biologique, Diversité fonctionnelle, Diversité structurale, Ecosphère, Ecosystèmes, Empreinte écologique, Energie géochimique biogène, Energie biogéochimique, Energie libre de Gibbs, Exergie, Entropie, Indice  $K_a$ , Information-structure, Mesure de la diversité biologique, Mesure de la diversité structurale, Néguentropie, Passif écologique, Théorie des Ecosystèmes, Valeur des services écosystémiques.

## Key words

Biodiversity, Biogenic geochemical energy, Biogéocénose, Biogeochemical cycles, Biogeochemical energy, Biological diversity, Biosphere, Distance to the thermodynamic equilibrium, Ecological assets, Ecological balance sheet, Ecological liabilities, Ecological Footprint, Ecosystems, Ecosystem Natural Capital Accounts, Ecosystem Theory, Entropy, Exergy, Functional diversity, Gibbs free energy, Information-structure, Input/Output analysis,  $K_a$  Index, Measurement of biological diversity, Measurement of structural diversity, Neguentropy, stoichiometric balance, Structural diversity, Physical Input/Output Table, Ecosystem thermodynamic balance sheet, Value of ecosystem services.

## Remerciements

Mes premières réflexions sur un développement *écologique* ne datent pas du début de ma thèse, mais de 1983, alors que j'étais auxiliaire du laboratoire LECSA (INRA, Montpellier). Elles se poursuivirent ensuite en pointillé, mais s'enrichirent pourtant, tout au long d'une vie professionnelle mouvementée, d'expériences très intenses en apprentissages et réalisations concrètes, sans lesquelles, jamais, je n'aurais pu mener à bien cette thèse, complexe et difficile.

C'est pourquoi, suivant un ordre chronologique, je veux tout d'abord exprimer ici ma gratitude à Monsieur Jean Louis Gorda, ancien Directeur Général du Groupe Meilland, sélectionneur mondialement célèbre de variétés de roses, qui toujours m'accorda sa confiance, jusque pour les tâches les plus complexes et diversifiées, et me transmis ainsi la force, l'expérience et l'humilité permettant d'affronter, et de traverser, les situations humaines et professionnelles les plus délicates, y compris celle de ma recherche doctorale.

Je voudrais ensuite remercier Edgard Malausséna, Maire de Villars sur Var (06), ancien Vice-président du Conseil régional Paca, ancien Président de l'ARPE, avec lequel j'ai plusieurs années durant parcouru l'entière gamme décisionnelle, politique, administrative, technique, des préoccupations environnementales d'une grande collectivité publique. Et qui le premier favorisa mon implication doctorale.

Dans ce même registre, je n'omettrai pas Marc Daunis, Sénateur-Maire de Valbonne-Sophia Antipolis, Président du PNRPA, ancien Président de l'ARPE, qui toujours aura répondu d'une humeur positive à mes sollicitations, et qui aura finalement contresigné la convention partenariale de recherche par laquelle je pourrai financer ma thèse. Qu'il veuille bien trouver ici l'expression renouvelée de ma reconnaissance.

Abordant le monde universitaire, je voudrais ensuite remercier Madame Sylvie Fauchoux, ancienne Présidente de l'Université de Versailles-Saint Quentin en Yvelines, ancienne Directrice du C3ED (renommé REEDS en 2010), qui accorda son crédit étonné à ma requête doctorale, alors formulée dans des termes peu conventionnels.

Jusqu'à la transmettre pour « instruction » à Martin O'Connor, Directeur de REEDS, qui deviendra mon Directeur de thèse. A cette personnalité sensible à l'humeur du monde et terriblement maître de son sujet, je dois beaucoup d'avoir écouté mon histoire, d'avoir entendu avec une perception rare le questionnement de fond de mon parcours professionnel, et d'avoir anticipé, avec sa pertinence scientifique de nature « holistique », tous les enjeux et chausse-trappes d'une problématique qui, toujours, devaient se révéler tels qu'il les avait prédits. Il fut un guide sûr de ses pas et conscient des dangers de la montagne, dont le brouillard, les orages passagers, voire même les incendies, n'auront su perturber la vision du but à atteindre. Que ce guide chevronné veuille donc bien recevoir ici le témoignage de ma profonde reconnaissance.

.....

.....

Merci enfin à Marie Loosfelt, qui a bien voulu prendre sur ses congés pour corriger ce long texte et me faire toutes suggestions utiles.

Quant à mes enfants, Paul-Emmanuel, Heroan, Ludovic, Arnaud, je leur dédie ce travail, avec l'espoir qu'ils en connaissent un jour les prolongements, quand bien même je serais parti pour une autre aventure.

## Sommaire simplifié

(Un sommaire détaillé, et une table des figures et tableaux sont disponibles en fin d'ouvrage)

<b>RESUME/ABSTRACT</b> .....	<b>4</b>
<b>MOTS CLES/KEY WORDS</b> .....	<b>5</b>
<b>REMERCIEMENTS</b> .....	<b>6</b>
<b>SOMMAIRE SIMPLIFIE</b> .....	<b>7</b>
<b>INTRODUCTION GENERALE</b> .....	<b>10</b>
A. <b>UNE INTERROGATION CENTRALE</b> .....	<b>11</b>
B. <b>LE VRAI CHALLENGE</b> . . . . .	<b>14</b>
C. <b>... ET SES ENJEUX</b> .....	<b>15</b>
D. <b>PLAN DE THESE</b> .....	<b>16</b>

### PREMIERE PARTIE : *Fondements du Bilan écologique, et problématique globale*

<b>.CHAPITRE I. FONDEMENTS DU BILAN <i>ÉCOLOGIQUE</i>, ET PROBLÉMATIQUE GLOBALE ...</b>	<b>19</b>
1.1 <b>FONDEMENTS DU BILAN ÉCOLOGIQUE</b> .....	<b>20</b>
1.1.1 <i>A la recherche de l'Écodéveloppement</i> .....	<b>20</b>
1.1.2 <i>De l'objectivation des relations homme-nature</i> .....	<b>24</b>
1.1.3 <i>De la mesure du travail de la Nature</i> . . . . .	<b>31</b>
1.1.4 <i>... au bilan des relations Homme-Nature</i> .....	<b>33</b>
1.1.5 <i>L'Empreinte écologique : une faille récurrente</i> .....	<b>34</b>
1.1.6 <i>CBD, Biodiversité et Développement Sostenable</i> .....	<b>45</b>
1.1.7 <i>Les prémisses d'un Bilan écologique</i> .....	<b>46</b>
1.2 <b>UNE PROBLÉMATIQUE GLOBALE</b> .....	<b>49</b>
1.2.1 <i>Mini panorama introductif à l'analyse énergétique</i> .....	<b>49</b>
1.2.2 <i>Le « Podolinsky Business »</i> .....	<b>52</b>
1.2.3 <i>La critique d'Engels</i> .....	<b>57</b>
1.2.4 <i>L'accumulation énergétique face aux Lumières</i> .....	<b>62</b>

### DEUXIEME PARTIE : *Recherche épistémologique et de nature fondamentale sur l'Actif écologique*

<b>.CHAPITRE II. L'ÉNERGIE DU VIVANT FACE AUX <i>LUMIÈRES</i></b> .....	<b>69</b>
2.1 <b>VERS UNE ÉNERGÉTIQUE DE LA NATURE (1914-1945)</b> .....	<b>70</b>
2.1.1 <i>Un contexte de recherche très particulier</i> .....	<b>70</b>
2.1.2 <i>Lotka et le « Business » de l'énergétique</i> .....	<b>73</b>
2.1.3 <i>Vers une « direction » de l'évolution</i> .....	<b>79</b>
2.1.4 <i>Les « successions » vers le climax</i> .....	<b>82</b>
2.1.5 <i>Un courant russe de la « directionnalité »</i> .....	<b>83</b>
2.1.6 <i>L'exception de Vernadsky</i> .....	<b>93</b>
2.1.7 <i>Cycle idéal de Carnot et accumulation énergétique</i> .....	<b>120</b>
2.1.8 <i>Conclusion : Vers un quatrième principe</i> .....	<b>126</b>
2.2 <b>ÉNERGIE, EXERGIE, DIVERSITÉ : RAPPEL DE QUELQUES NOTIONS FONDAMENTALES</b>	<b>137</b>
2.2.1 <i>Introduction</i> .....	<b>137</b>
2.2.2 <i>Éléments de thermodynamique classique</i> .....	<b>137</b>
2.2.3 <i>Approche statistique de la diversité</i> .....	<b>155</b>
2.3 <b>EXERGIE ET BIODIVERSITÉ : SOLUTIONS ET PROBLÈMES D'AUJOURD'HUI</b> .....	<b>161</b>
2.3.1 <i>L'exergie versus les deux principes biogéochimiques</i> .....	<b>161</b>
2.3.2 <i>Quatrième principe et théorie de l'information</i> .....	<b>163</b>
2.3.3 <i>L'exergie versus l'énergie biogéochimique du vivant</i> .....	<b>165</b>

2.4	EXERGIE ET BIODIVERSITE : UNE PROBLEMATIQUE <i>VITALE</i> .....	172
2.4.1	<i>Premier aspect : L'indice H' de Shannon et la mesure de la diversité.</i> .....	172
2.4.2	<i>Deuxième aspect : Les facteurs <math>\beta</math> et la mesure de la diversité biologique</i> .....	185
2.5	GRANDE SYNTHÈSE DU CHAPITRE II .....	191
2.5.1	<i>Synthèse des relations thermodynamiques économie-nature</i> .....	191
2.5.2	<i>Synthèse fonctionnelle de <math>pV</math> et <math>d(pV)</math>.</i> .....	193
2.5.3	<i>Problématique conclusive et objectifs de résolution</i> .....	199
2.5.4	<i>Synthèse conclusive sur la relation exergie/ biodiversité.</i> .....	204
<b>.CHAPITRE III. MESURER NOS ACTIFS ECOLOGIQUES.....</b>		<b>208</b>
3.1	L'INDICE $\bar{K}_A$ ET LA DISTANCE A L'EQUILIBRE STATISTIQUE ( $D_{ES}$ ) .....	209
3.1.1	<i>Première hypothèse fondamentale.</i> .....	209
3.1.2	<i>Conditions générales d'élaboration de l'indice recherché.</i> .....	209
3.1.3	<i>Critères de mise au point</i> .....	211
3.1.4	<i>L'indice <math>\bar{K}_a</math> de distance à l'équilibre</i> .....	214
3.1.5	<i>L'indice <math>\bar{K}_a</math> mesure la diversité structurale : vérifications</i> .....	219
3.2	CLARIFICATIONS : FONCTIONS REDOX DE LA BIOSPHERE ET DE L'ECOSPHERE .....	233
3.2.1	<i>Caractérisation de la Biosphère, le « domaine » du vivant</i> .....	233
3.2.2	<i>De la Biosphère à l'Ecosphère</i> .....	237
3.2.3	<i>Caractérisation de l'Ecosphère, la « maison » du vivant.</i> .....	243
3.2.4	<i>Synthèse de la section : <math>pV</math>, <math>d(pV)</math> et la distance à l'équilibre « redox » du vivant.</i> .....	252
3.3	L'INDICE $\bar{K}_A$ ET LA DISTANCE A L'EQUILIBRE THERMODYNAMIQUE ( $D_{ET}$ ).....	255
3.3.1	<i>Seconde hypothèse fondamentale</i> .....	255
3.3.2	<i>Conjugaison <math>pV.m</math>, Joule.mètre et <math>D_{ET}</math>.</i> .....	257
3.3.3	<i>Mesurer les deux composantes de la <math>D_{ET}</math> : <math>D_{ER}</math> et <math>D_{EO}</math>.</i> .....	260
3.4	MESURE DE LA $D_{ET}$ ( $D_{ER} + D_{EO}$ ) D'UN ECOSYSTEME : VERIFICATION, COMPARAISONS ET PERTINENCE.....	265
3.4.1	<i>Objectifs de vérification</i> .....	265
3.4.2	<i>Etude de cas : L'écosystème marin de l'estuaire de Mondego (Portugal).</i> .....	265
3.5	CONCLUSIONS DU CHAPITRE III ET DE LA DEUXIEME PARTIE.....	280
3.5.1	<i>Sur la recherche et ses résultats.</i> .....	280
3.5.2	<i>Sur la signification écosystémique du Joule.mètre (<math>J.m</math>)</i> .....	281
3.5.3	<i>Sur la signification économique du Joule.mètre (<math>J.m</math>)</i> .....	286

### TROISIEME PARTIE : Développements méthodologiques, et mise en œuvre du Bilan écologique

<b>.CHAPITRE IV. TERRITOIRE ET ANNEES DE REFERENCE .....</b>		<b>290</b>
4.1	TERRITOIRE DE REFERENCE : LES « COMMUNES » DU PNRPA.....	291
4.2	ANNEES DE REFERENCE.....	293
<b>.CHAPITRE V. ACTIF(S) ECOLOGIQUE(S).....</b>		<b>294</b>
5.1	L'ACTIF ECOLOGIQUE : DEFINITION GENERALE ET EMPRISE .....	295
5.2	METHODOLOGIE DE CALCUL : DE LA $D_{ET}$ D'UN ECOSYSTEME A L'ACTIF ECOLOGIQUE D'UN TERRITOIRE .....	296
5.2.1	<i>De l'écosystème au territoire : Problématique de synthèse</i> .....	296
5.2.2	<i>Justification et présentation du cadre méthodologique</i> .....	297
5.2.3	<i>Mise en œuvre du cadre méthodologique.</i> .....	301
5.3	<b>ACTIF ECOLOGIQUE : PARTIE 1 - STOCKS ANNEE N.....</b>	<b>303</b>
5.3.1	<i>Stocks de carbone : Données source, principes de calcul</i> .....	303
5.3.2	<i>Stocks de carbone et diversité structurale du Territoire</i> .....	305
5.3.3	<i>Stocks d'exergie <math>pV</math> et <math>D_{ET}</math> (<math>D_{ER} + D_{EO}</math>) des communes du Territoire (année n)</i> .....	306
5.4	<b>ACTIF ECOLOGIQUE : PARTIE 2 - FLUX D'EXERGIE ANNEE N+1 .....</b>	<b>307</b>
5.4.1	<i>Flux de carbone : Données source et méthode de calcul</i> .....	307
5.4.2	<i>Flux de carbone : NPP du Territoire</i> .....	309
5.4.3	<i>Stœchiométrie territoriale : Méthodologie générale</i> .....	310
5.4.4	<i>Stœchiométrie territoriale : Résultats</i> .....	313
5.5	<b>ACTIF ECOLOGIQUE : PARTIE 3 - STOCKS ANNEE N + 1 .....</b>	<b>317</b>

<b>.CHAPITRE VI. PASSIF(S) ECOLOGIQUE(S).....</b>	<b>320</b>
6.1 LE <b>PASSIF ECOLOGIQUE</b> : PRESENTATION GENERALE ET SIGNIFICATION .....	321
6.1.1 <i>Présentation</i> .....	321
6.1.2 <i>Signification</i> .....	321
6.1.3 <i>Conséquences</i> .....	323
6.2 METHODOLOGIE DE CALCUL : ANTECEDENTS ET PROBLEMATIQUE .....	324
6.2.1 <i>Antécédents</i> .....	324
6.2.2 <i>La problématique d'une méthodologie intégrée</i> .....	326
6.3 UNE NOUVELLE METHODOLOGIE INTEGREE .....	330
6.3.1 <i>Généralités : Le TES français et la SUT anglo-saxonne</i> .....	330
6.3.2 <i>Phase 1 - Méthodologie de calcul du nouveau passif national</i> .....	331
6.3.3 <i>Phase intermédiaire : Passer des entreprises aux ménages</i> .....	335
6.3.4 <i>Phase 2 - Méthodologie de désagrégation du passif national</i> .....	337
6.3.5 <i>Cadre synthétique de calcul du Passif écologique</i> .....	338
6.4 RESULTATS PHASE 1 : LE <b>PASSIF ECOLOGIQUE</b> DE LA FRANCE.....	340
6.4.1 <i>TES 14 monétaire complet de la France, et son annexe</i> .....	340
6.4.2 <i>Données de référence du TES biophysique (ou Passif écologique)</i> .....	342
6.4.3 <i>Passif écologique de la France, reflet biophysique du TES monétaire</i> .....	343
6.5 RESULTATS PHASE 2 : LE <b>PASSIF ECOLOGIQUE</b> DU TERRITOIRE .....	347
6.5.1 <i>Le TES 14 monétaire complet du Territoire, et son annexe</i> .....	347
6.5.2 <i>Le Passif écologique du Territoire, reflet biophysique du TES monétaire</i> .....	349
6.6 EXTRAPOLATIONS DU <b>PASSIF ECOLOGIQUE</b> .....	351
6.6.1 <i>Extrapolations du Passif écologique de la France</i> .....	351
6.6.2 <i>Extrapolations du Passif écologique du Territoire</i> .....	357
<b>.CHAPITRE VII. BILAN ECOLOGIQUE.....</b>	<b>362</b>
7.1 VERSION A, FONCTIONNELLE ET SIMPLIFIEE .....	363
7.1.1 <i>Compléments méthodologiques</i> .....	363
7.1.2 <i>Résultat : Bilan écologique du Territoire (version A)</i> .....	366
7.2 VERSION B, STOECHIOMETRIQUE (ET THERMODYNAMIQUE) .....	374
7.2.1 <i>Le postulat d'un bilan stœchiométrique de l'Anthropocène</i> .....	374
7.2.2 <i>Quelques principes conceptuels et méthodologiques</i> .....	376
7.2.3 <i>Résultat : Bilan écologique du Territoire (version B)</i> .....	380
<b>. CONCLUSION GENERALE.....</b>	<b>384</b>
A. EXIGENCES, AUTONOMIE ET TRAITEMENT DU SUJET .....	385
B. RESULTATS COMPARES AUX ENJEUX ET OBJECTIFS .....	387
1. <i>Rendre compte de la diversité biologique</i> .....	387
2. <i>Calculer l'actif et le passif écologiques du Territoire</i> .....	389
C. SIGNIFICATION ET UTILITE DU BILAN ECOLOGIQUE .....	390
1. <i>Une signification générale</i> .....	390
2. <i>Une utilité territoriale : Rendre le constat explicite, orienter vers de nouvelles activités</i> .....	392
3. <i>Une utilité globale : Caractériser les voies d'un développement écologique</i> .....	394
D. APPROFONDISSEMENT DES RESULTATS & PERSPECTIVES DE RECHERCHE .....	396
1. <i>Regard d'ensemble sur une version pilote</i> .....	396
2. <i>Vérifier, valider les hypothèses, et élargir leur champ d'application</i> .....	397
3. <i>Boucler les concepts opératoires et principes de calcul</i> .....	398
4. <i>Développer le Bilan fonctionnel</i> .....	398
5. <i>Vérifier, valider le postulat du bilan stœchiométrique, et le développer</i> .....	399
E. EXPLORER LES CHEMINS DU DEVELOPPEMENT ECOLOGIQUE.....	400
<b>REFERENCES SIGNIFICATIVES.....</b>	<b>404</b>
<b>LISTE DES SIGLES ET ABREVIATIONS.....</b>	<b>414</b>
<b>TABLE DES FIGURES, TABLEAUX ET ILLUSTRATIONS.....</b>	<b>415</b>
<b>SOMMAIRE DETAILLE.....</b>	<b>418</b>

## Introduction générale

L'objectif de notre thèse, le *Bilan écologique*, est la réalisation d'un outil d'évaluation des impacts du développement économique sur l'environnement et la biodiversité des territoires naturels (un diagnostic de l'Anthropocène), en vue notamment de soutenir la formalisation et la mise en œuvre d'un développement *écologique*.

Il existe des acceptions très différentes d'un développement prenant en compte l'environnement et la biodiversité : développement durable ou soutenable, soutenabilité faible ou forte, écodéveloppement, décroissance, ...

Et il existe nombre d'outils, basés sur des *indicateurs* très variés, souvent regroupés en *batteries d'indicateurs*, susceptibles de nous guider vers l'accomplissement de leurs objectifs. Ceux-ci d'ailleurs, établis en aval de la formulation de ces acceptions, reflètent souvent leurs contradictions. Boutaud (2005) en a établi un constat pertinent et très explicite.

Il existe aussi des *indicateurs de synthèse*, dont l'optique est de nous aider, en amont, à *conceptualiser la soutenabilité*, puis à la planifier et à la développer. Le plus connu à ce jour, à l'échelle mondiale, est l'*Empreinte écologique* (Rees, 1992 ; Wackernagel, 1994 ; GFN, 2010).

Nous basions primitivement notre thèse sur un programme de recherche appliquée qui s'adossait à cet indicateur de synthèse : *L'Empreinte écologique des Parcs Naturels Régionaux* (programme EMPR PNRs).

Mais nous avons dû nous résigner à un *constat de carence* selon lequel l'Empreinte écologique ne saurait être, ni appliquée aux espaces et territoires naturels, ni améliorée en ce sens. Bien que ce soit son ambition affichée, elle ne mesure en effet ni le capital naturel, ni la biodiversité, ce dernier point étant confirmé par la *Convention pour la Diversité Biologique* (CBD, 2005).

Il nous aura fallu cependant plusieurs années pour établir notre constat définitif, reformuler en conséquence les objectifs de notre thèse, développer nos propres propositions, et finalement les dégager totalement de leur dépendance à cet outil.

Ceci jusqu'à ce que le *Bilan écologique* devienne un outil entièrement autonome, potentiellement applicable à tous types d'espaces et territoires, qu'ils soient plus naturels ou plus urbains.

Cette prise d'autonomie doit être vue comme un long processus de différenciation qui aura déterminé l'orientation définitive de notre thèse.

Thèse que nous aurons repositionnée dans le creuset d'une *interrogation centrale*, née de la confrontation séminale entre la première tentative d'analyse *énergétique* des relations homme-nature, et les grands principes, alors émergents, de la thermodynamique.

Son étendue métaconceptuelle aura renouvelé les questionnements de la *Physiocratie* et fondé l'existence de l'*Ecologie globale*, de la *Thermodynamique des écosystèmes* et de l'*Economie écologique*.

C'est de cette interrogation centrale dont nous chercherons à rendre compte.

Après l'avoir exposée, nous en déduisons dans cette introduction le challenge et les enjeux de notre recherche doctorale, puis notre plan de thèse.

## A. Une interrogation centrale

La *Cité (Polis)* fut pensée à l'aube de son apparition comme « consubstantielle » de la démocratie, et ce en totale séparation de l'*Oïkos*<sup>1</sup> (Platon, *La République* ; Vernant, 1974).

Au sens purement *physique*, une description *originelle*<sup>2</sup> très simplifiée de la Cité nous la présenterait comme un volume construit intégrant l'habitat et les services communs essentiels à la vie du citoyen, l'ensemble étant circonscrit par un périmètre spécifique, forme de rempart la séparant et l'isolant du monde extérieur<sup>3</sup> (*Oïkos* et nature au sens large), duquel elle tirera ses ressources de développement et d'entretien.

Au regard de l'*Analyse systémique* (Von Bertalanffy, 1968), la cité est ainsi un système *ouvert*, bien délimité par une frontière, à travers laquelle elle échange énergie et matière avec le monde extérieur.

Or la *Thermodynamique des processus irréversibles* (Prigogine, 1968) a étendu les limites de la thermodynamique classique, qui s'est principalement occupée des systèmes *fermés*, pour généraliser ses méthodes aux systèmes *ouverts*.

Ce qui nous autorise à aborder la problématique de la cité et des limites de son développement, en rapport avec son mode de consommation et son milieu d'approvisionnement, sous l'angle de la thermodynamique, et notamment de son second principe, la loi d'accroissement de l'entropie (Carnot, 1824 ; Clausius, 1865).

Loi à propos de laquelle nous apprenons d'Erwin Schrödinger que :

... la loi d'accroissement de l'entropie, la plus importante, la plus générale de toutes, pourrait être comprise sans le secours d'hypothèses spéciales car elle n'exprime rien d'autre que le *désordre* moléculaire lui-même [Schrödinger, 1944:140].

Soit un concept donnant un contenu appréhensible à la mystérieuse notion d'*entropie*, et qu'Edgar Morin a précisé dans son chapitre introductif de *La méthode* :

Ainsi, tout accroissement d'entropie est un accroissement de désordre interne, et l'entropie maximale correspond à un désordre moléculaire total au sein d'un système, ce qui se manifeste au niveau global par l'homogénéisation et l'équilibre. Le second principe ne se pose plus seulement en termes de travail. Il se pose en termes d'*ordre* et de *désordre* [Morin, 1977].

Ordre et désordre sont rattachables à une problématique de l'économie face à la nature que Nicolas Georgescu Roegen, posant alors un des plus vifs débats de l'*Economie écologique*, a formulée ainsi :

Toute l'histoire économique de l'humanité prouve sans contredit que la nature elle aussi joue un rôle important dans le processus économique ainsi que dans la formation de la valeur économique. Il est grand temps, me semble-t-il, d'accepter ce fait et de considérer ses conséquences pour la problématique économique de l'humanité. Car ainsi que je tenterai de le montrer ci-après, certaines de ces conséquences revêtent une importance exceptionnelle pour la compréhension de la nature et

<sup>1</sup> Nous entendons dans une première approche, l'*Oïkos*, d'un sens plus complexe que sa traduction primitive (maison, maisonnée, patrimoine), comme l'association d'un milieu naturel déterminé, partie de l'Ecosphère, et d'un ensemble de personnes et de biens de longue date intégrés à et en équilibre avec ce milieu, culturellement et économiquement. Augustin Berque, grand spécialiste de la *Mésologie* (l'étude des milieux humains) a longuement travaillé sur un concept relativement proche, l'*Ecoumène*, auquel on pourra se référer (Berque, 1987 - <http://ecoumene.blogspot.fr/>).

<sup>2</sup> Cette précision parce que, ultérieurement, la *Cité* absorbera l'espace rural de l'*Oïkos*, et deviendra la *Cité-Etat*, intégrant la *chôra*, espace rural extérieur, et l'*astu*, espace intérieur clos de remparts (Berque, 2011).

<sup>3</sup> En chinois, c'est le sinogramme *chéng* 城 (muraille) qui a historiquement signifié la ville (Berque, 2014).

de l'évolution de l'économie humaine [...] Quelques économistes ont relevé que l'homme ne peut ni créer ni détruire de la matière ou de l'énergie, vérité qui découle du *principe de conservation de la matière-énergie*, autrement dit du premier principe de la thermodynamique. Cependant nul ne paraît avoir été frappé par la question, si troublante à la lumière de cette loi: « Que fait alors le processus économique ? » [...] La réponse à la question sur ce que fait le processus économique est simple : il ne produit ni ne consomme de la matière-énergie ; il se limite à absorber de la matière-énergie pour la rejeter continuellement. C'est ce que la pure physique nous enseigne [...] L'économiste non orthodoxe que je suis ajouterait que ce qui entre dans le processus économique consiste en ressources naturelles de valeur et que ce qui en est rejeté consiste en déchets sans valeur. Or, cette différence qualitative se trouve confirmée, quoique en termes différents, par une branche particulière et même singulière de la physique connue sous le nom de thermodynamique. Du point de vue de la thermodynamique, *la matière-énergie absorbée par le processus économique l'est dans un état de basse entropie et elle en sort dans un état de haute entropie* [...] L'énergie se présente sous deux états qualitativement différents, l'énergie utilisable ou *libre*, sur laquelle l'homme peut exercer une maîtrise presque complète, et l'énergie inutilisable ou *liée*, que l'homme ne peut absolument pas utiliser [...] Lorsqu'on brûle un morceau de charbon, son énergie chimique ne subit ni diminution ni augmentation. Mais son énergie libre initiale s'est tellement dissipée sous forme de chaleur, de fumée et de cendres, que l'homme ne peut plus l'utiliser. Elle s'est dégradée en énergie liée. L'énergie libre est de l'énergie qui manifeste une différence de niveau telle que l'illustre tout simplement la différence entre les températures intérieure et extérieure d'une chaudière. L'énergie liée est au contraire, de l'énergie chaotiquement dissipée. Il est possible d'exprimer cette différence d'une autre façon encore. *L'énergie libre implique une certaine structure ordonnée* comparable à celle d'un magasin où toutes les viandes se trouvent sur un comptoir, les légumes sur un autre, etc. *L'énergie liée est de l'énergie dispersée en désordre*, comme le même magasin après avoir été frappé par une tornade. *C'est la raison pour laquelle l'entropie se définit aussi comme une mesure de désordre*<sup>4</sup>. Elle rend compte du fait que la feuille de cuivre comporte une entropie plus basse que celle du minerai d'où elle a été extraite [...] C'est ce qui arrive avec des cubes de glace dans un verre, qui, une fois fondus, ne se reformeront pas d'eux-mêmes. D'une façon générale, *l'énergie thermique libre d'un système clos se dégrade continuellement et irrévocablement en énergie liée*. L'extension de cette propriété de l'énergie thermique à toutes les autres formes d'énergie conduit au Deuxième Principe de la Thermodynamique, appelé aussi la Loi de l'Entropie. Cette loi stipule que l'entropie (c'est-à-dire la quantité d'énergie liée) d'un système clos croît constamment ou que *l'ordre d'un tel système se transforme continuellement en désordre* [...] La vérité est que tout organisme vivant s'efforce seulement de maintenir constante sa propre entropie. Et dans la mesure où il y parvient il le fait en puisant dans son environnement de la *basse entropie* afin de compenser l'augmentation de l'entropie à laquelle son organisme est sujet comme tout autre structure matérielle [...] Rien ne saurait donc être plus éloigné de la vérité que l'idée du processus économique comme d'un phénomène isolé et circulaire ainsi que le représentent les analyses tant des marxistes que des économistes orthodoxes. Le processus économique est solidement arrimé à une base matérielle qui est soumise à des contraintes bien précises. C'est à cause de ces contraintes que le processus économique comporte une évolution irrévocable à sens unique [Georgescu Roegen, 1979:41-44].

Ceci nous permet finalement d'énoncer que la cité est un système ouvert qui produit et maintient son *ordre interne* (au delà de l'équilibre thermodynamique) en consommant l'*ordre externe* du milieu, et en rejetant le *désordre* produit (l'entropie) dans ce milieu.

Ce en quoi elle répond à la définition d'une *structure dissipative*<sup>5</sup>, telles qu'Ilya Prigogine les a caractérisées. Comme il l'a dit lui-même :

---

<sup>4</sup> H. Szdjian (2005) précise : « On associe généralement l'entropie ou le nombre de micro états contenus dans un macroétat à la notion de désordre. En effet, lorsque le nombre des microétats est grand, les particules du système ont des possibilités plus nombreuses de se déplacer et de visiter de nouveaux sites. L'agitation des particules augmente, ce qui signifie que le désordre du système augmente. C'est pourquoi, on pourrait aussi interpréter le deuxième principe de la thermodynamique en affirmant que les processus irréversibles tendent à augmenter le désordre du système et l'équilibre n'est atteint que lorsque le désordre atteint son état extrême. »

<sup>5</sup> La *Théorie des structures dissipatives* s'attache notamment à formuler la production d'entropie des systèmes ouverts.

L'exemple le plus simple de structure dissipative que l'on peut évoquer par analogie, c'est la ville [Prigogine, 1993:28]

La Cité est une *structure dissipative anthropogénique*<sup>6</sup>.

De ce fait, tout développement, c'est à dire toute augmentation de son ordre interne, se traduira *ipso facto* par un niveau correspondant de consommation de l'ordre externe, remplacé par du désordre entropique<sup>7</sup>.

Et comme il faut bien que cet ordre externe trouve son origine dans le milieu naturel, cela pourrait suffire à définir les paramètres élémentaires d'un *bilan thermodynamique* des relations homme-nature, qui comparerait l'ordre produit par le milieu naturel (actif) à l'ordre consommé et au désordre généré par la cité (passif), afin d'établir leur balance (solde).

La quête d'une telle comparaison n'est pas nouvelle. Les termes du débat qu'elle introduit, pour aussi moderne qu'il paraît, ont été posés dans leurs fondements il y a plus d'un siècle. Par Engels (1882), alors qu'il rendait compte à Marx de la proposition « révolutionnaire » d'un physicien socialiste ukrainien pour le moins enthousiasme réfugié à Montpellier : *La théorie de l'accumulation énergétique* (Podolinsky, 1880).

Tout au long de la première moitié du XXe siècle, la confrontation séminale de cette théorie aux contradictions formulées par Engels, alimentera sous diverses formes les réflexions les plus avancées concernant les relations homme-nature.

Et ce débat sera plus tard pour beaucoup dans la fondation de l'*Analyse énergétique*, de l'*Ecologie globale*, de la *Thermodynamique des écosystèmes* et de l'*Ecologie économique*.

Mais pour autant, quels que soient les immenses progrès depuis accomplis, il ne fut à notre connaissance jamais entièrement résolu dans ses fondements !

Cette carence interdit encore aujourd'hui toute mesure *biophysique* de l'accumulation énergétique de la Biosphère, selon une métrique qui, rendant compte du second principe, permettra la comparaison recherchée entre ordre et désordre,

et introduira les deux volets indissociables de l'*interrogation centrale* qui tout au long de notre thèse conduira nos *objectifs* :

(a) *Quels aspects des activités systémiques de la nature et de l'homme caractérisent l'ordre et le désordre thermodynamiques comme opérateurs désignant l'Actif et le Passif d'un Bilan des relations homme-nature ?*

(b) *Quelle unité de compte ou de valeur, commune aux activités de la nature et de l'homme, permettra la mesure thermodynamique comparative de la production d'ordre et de désordre, et autorisera l'établissement d'un bilan révélateur des relations de cause à effet, et significatif des impacts cumulés ?*

---

<sup>6</sup> W. Rees (1992), inventeur de l'Empreinte écologique, l'a nommée *trou noir écologique*, mais ce concept obère le caractère ordonné (voire organisé) de la cité, quand il existe par ailleurs un véritable trou noir, l'*humus*, qui mérite bien mieux ce qualificatif « entropique », car il caractérise une utilité naturelle fondamentale du rapport entropie/néguentropie que nous aurons l'occasion d'étudier.

<sup>7</sup> En parallèle aux principes thermodynamiques, la *Cybernétique des organisations* a développé un « métaconcept » caractérisant l'ordre et le désordre en termes d'information, la *Loi de la Variété Requise* (Ashby, 1952 ; Lussato, 1987 ; Ducrocq, 1989). Supposée refléter une loi naturelle, elle stipule que tout système de contrôle (ordre), d'une variété inférieure à celle du système contrôlé, génère une variété incontrôlable (désordre). Dans cette acceptation, la Cité devient un système de contrôle de la nature (serait-elle humaine), mais d'une variété (diversité) bien inférieure à celle-ci, d'où une production proportionnelle de variété incontrôlable (désordre). Ce qui nous autoriserait à voir les grandes crises actuelles, y compris sanitaires, comme des contreparties directes de la Cité mondialisée.

## B. Le vrai challenge ...

Notre état de la question *introdutif* rendra compte d'une translation historique du débat *sur la nature de la Nature*, dont nous déduirons un cadre sémantique d'analyse et de synthèse des relations homme-nature, et à partir duquel nous rendrons compte des carences de l'*Empreinte écologique*, en forme de schéma éclairant ses différentes critiques, puis présenterons l'assise conceptuelle et le cadre opérationnel de mesure du nouveau *Bilan écologique* que nous proposons.

Ceci en forme de réponse au *premier volet* de notre interrogation centrale.

Mais le vrai challenge apparaîtra avec le *second volet* de cette interrogation :

*Quelle unité de compte ou de valeur, commune aux activités de la nature et de l'homme, permettra la mesure thermodynamique comparative de la production d'ordre et de désordre, et autorisera l'établissement d'un bilan révélateur des relations de cause à effet, et significatif des impacts cumulés ?*

Ce volet nous mènera en effet au pied d'une problématique globale, de nature *fondamentale*, qui interdit, encore aujourd'hui, toute mesure *biophysique* consensuelle du travail de la nature, et notamment de l'*accumulation énergétique* des écosystèmes.

Si, en référence au second principe de la thermodynamique, Schrödinger (1944), Morin (1977), Georgescu Roegen (1979), Atlan (1979) associent le *désordre* à la notion d'entropie (de signe positif), l'*ordre*, de la Nature, résultante de sa biodiversité, est associé par certains de ces derniers et de nombreux auteurs avec eux (voir plus bas), plutôt qu'à une *basse entropie*<sup>8</sup>, à une entropie de signe *néгатif*, généralement traduite par le terme *néguentropie*.

Or la néguentropie serait un concept *totalemt absent* de la physique (Bailly & Longo, 2008). Parmi les auteurs l'ayant abordé, il en est même beaucoup pour avoir montré qu'il suscitait, notamment entre la biologie (sciences de la vie) et la physique (sciences techniques de l'économie), des divergences très profondes relatives à l'interprétation du second principe (Maxwell, 1872; Lotka, 1922; Vernadsky, 1930; Schrödinger, 1944; Brillouin, 1956; Bonsack, 1961; Von Bertalanffy, 1968; Morin, 1977; Atlan, 1979; Passet, 1979; Sheldrake, 1981; Lussato, 1987; Ducrocq, 1989; O'Connor, 1994; Odum, 1996; Jørgensen, 2007).

Et pour le moins des problèmes non résolus (Von Bertalanffy, 1968:155).

Ainsi, en premier lieu, la question de l'*origine* et de la *production* de néguentropie est depuis Clausius jusqu'à nos jours ignorée en thermodynamique ; et ceci même si ce dernier avait parfaitement identifié le concept, et Prigogine après lui (Loiret, 2012a, 2013a).

Il en découle en second lieu que l'on ne sait correctement *mesurer* la néguentropie, et avec elle la biodiversité. Les outils de la théorie de l'information censés la mesurer, à l'exemple notable de l'*indice H' d'entropie de Shannon* (1948), se révèlent en contradiction formelle avec cet objectif (Bonsack, 1961 ; Lussato, 1987 ; Loiret, 2013a).

Ces deux volets de notre interrogation centrale, et les deux composantes de la problématique globale découlant de son second volet, porteront ainsi notre thèse sur le terrain d'une recherche aux enjeux très diversifiés<sup>9</sup>.

---

<sup>8</sup> Comme c'était le cas de Georgescu-Roegen, dans la longue citation du paragraphe précédent.

<sup>9</sup> Que nous nous efforcerons de traiter en visant une cohérence maximale du propos.

## C. ... et ses enjeux

Etant formulées dans l'introduction générale les deux composantes de notre interrogation centrale, les enjeux principaux de notre thèse seront les suivants :

### **Première partie** : *Fondements du Bilan écologique, et problématique globale*

(Premier volet de notre interrogation centrale)

- Introduire le cadre général du débat des relations homme-nature dans lequel s'inscrit le Bilan écologique, notamment face à l'Empreinte écologique.
- Présenter *contradictoirement* l'assise conceptuelle du Bilan écologique.
- Dessiner le cadre opérationnel de mesure de l'Actif et du Passif écologiques.
- Approfondir le débat et positionner dans l'histoire des idées l'échec fondateur rencontré, vis à vis du second principe de la thermodynamique, par la première tentative de mesure *biophysique* du travail de la nature : *La théorie de l'accumulation énergétique* (1880-1882).
- Formuler en regard de cet échec les deux composantes de notre problématique globale concernant l'Actif écologique (cf. challenge).

### **Deuxième partie** : *Recherche épistémologique et de nature fondamentale sur l'Actif écologique*

(Partie fondamentale relative au second volet de notre interrogation centrale)

Traiter les deux composantes de notre problématique globale, et notamment :

(a) **Première composante** : Situer le contexte et reconstituer les liens brisés d'une histoire méconnue des développements épistémologiques qui, à la suite de cet échec fondateur, ont repositionné le concept *néguentropique* d'accumulation énergétique dans le cadre formel de la thermodynamique, avec l'idée force d'un *quatrième principe* reliant directement l'énergétique de la nature à l'évolution des espèces et au développement de la biodiversité.

(b) **Deuxième composante** : Développer les deux hypothèses vouées à y répondre, et à leur suite, définir, formuler, proposer et chercher à vérifier une nouvelle unité de mesure de *distance à l'équilibre thermodynamique* (DET) de la diversité biologique, qualifiant l'accumulation énergétique du capital naturel (stocks) et sa variation saisonnière (flux), et rendant compte des dimensions structurales et fonctionnelles de l'« ordre » naturel, tel qu'il est produit par cette diversité, et consommé par les processus économiques.

### **Troisième partie** : *Développements méthodologiques du Bilan écologique*

(Partie méthodologique relative au second volet de notre interrogation centrale)

- Définir les différents paramètres méthodologiques de mise en œuvre de cette nouvelle métrique pour le calcul de l'Actif écologique, les appliquer en grandeur réelle sur un territoire naturel pilote.
- Faire de même pour le Passif écologique de la population urbaine de ce même territoire, toutes formes de pollution étant susceptibles d'être prises en compte.
- Relier causes et effets par le Bilan écologique de ce territoire, dans des dimensions susceptibles de caractériser sa variation globale de DET (diagnostic d'état de la matière vivante et de la biodiversité), et selon un processus extensible à l'échelle de la Biosphère. Estimer ainsi le juste impact de la perturbation anthropogénique sur la biodiversité et la Biosphère.

L'ensemble d'enjeux en interrelation qui s'ensuit justifie notre thèse à différents niveaux ; nous en étudierons, discuterons et développerons les questions, problématiques spécifiques et solutions proposées selon le plan de travail suivant :

## D. Plan de thèse

---

### Première partie : *Fondements du Bilan écologique, et problématique globale*

---

Constituée du seul **chapitre I**, son objectif est de présenter les motivations et le contexte général d'élaboration de notre thèse, de répondre au *premier volet* de l'interrogation centrale exposée dans notre introduction générale, puis de poser la problématique globale correspondant au *second volet* de cette interrogation.

Elle introduit le cadre général du débat des relations homme-nature dans lequel s'inscrit le Bilan écologique, dont elle extrait, vis à vis notamment de l'Empreinte écologique, l'autonomie de son assise conceptuelle et son cadre d'analyse et de mesure (réponse au *premier volet* de l'interrogation centrale). Elle approfondit ensuite ce débat et le positionne dans l'histoire des idées pour en extraire les deux composantes de la problématique globale (*second volet* de son interrogation) à laquelle est confrontée notre thèse.

---

### Deuxième partie : *Recherche épistémologique et de nature fondamentale sur l'Actif écologique*

---

Son objectif est de répondre aux problématiques introduites par le *second volet* de notre interrogation centrale et d'aboutir à un ensemble de propositions autorisant le processus de calcul du Bilan écologique.

Le **chapitre II** a pour objectif de répondre à la première composante de notre problématique globale, le principe d'accumulation énergétique, puis d'introduire les deux aspects problématiques relatifs à sa seconde composante.

Il étudie et reconstitue dans leurs grandes lignes le contexte historique et la chronologie *méconnus* des phases épistémologiques au long desquelles la *biologie évolutionnaire* a formulé, puis la *biogéochimie* a approfondi, les concepts d'*aromorphose* et de *directionnalité de l'évolution*, pour aboutir aux *deux principes de la biogéochimie*, qui établissent la corrélation absolue entre, d'une part, l'évolution des espèces et de leur biodiversité, d'autre part l'accumulation énergétique de la Biosphère et de l'Ecosphère. Ce qui aura fondé la pertinence d'un *quatrième principe* de la thermodynamique. Puis il étudie de manière critique les propositions significatives de mesure de l'*exergie* géochimique du vivant et/ou de la biodiversité, pour aboutir à la formulation des deux aspects de la question relative à la seconde composante de notre problématique globale. Après quoi il établit une grande synthèse posant le cadre général de sa résolution.

Le **chapitre III** a pour objectif de répondre aux deux aspects de la seconde composante de notre problématique globale, la mesure de l'énergie *biogéochimique* de la matière vivante, dans une dimension commune à la nature et à l'économie.

Il développe deux hypothèses de résolution de cette question, et à leur suite les propositions relatives à (a) une unité de mesure statistique de la diversité structurale des territoires, et (b) une unité de mesure thermodynamique de la diversité biologique des écosystèmes, l'exergie pV.m ; qui sera supposée mesurer la distance à l'équilibre thermodynamique (DET) des organismes et écosystèmes. Après quoi il met en œuvre plusieurs tests de vérification, au regard des propositions significatives antérieures, qui autorisent à priori le développement du système de mesure du Bilan écologique.

---

### Troisième partie : *Développements méthodologiques du Bilan écologique*

---

Elle a pour objectif de développer et de mettre en œuvre à l'échelle d'un territoire naturel pilote, les communes du parc naturel régional des Préalpes d'Azur (PNRPA - 06, nommé le Territoire), les principes méthodologiques de calcul de l'Actif et du Passif écologique, jusqu'à la réalisation finale de son Bilan écologique, en deux versions distinctes.

Le **chapitre IV** présente le Territoire et précise les années de référence du bilan.

Le **chapitre V** a pour objectif de développer les principes méthodologiques de calcul de l'Actif écologique, puis de les appliquer aux espaces naturels du Territoire.

Il développe à la suite des chapitres précédents les principes généraux du système de mesure utilisant la nouvelle métrique que nous proposons, jusqu'à leur application. Soit, d'une part, l'estimation des stocks d'exergie pV.m des espaces naturels pour l'année n de référence, d'autre part, des flux annuels de production d'exergie pV.m (*stœchiométrie territoriale*) pour l'année n+1, permettant de calculer les stocks de l'année n+1.

Le **chapitre VI** a pour objectif de développer les principes méthodologiques simplifiés de calcul du Passif écologique, de l'échelle nationale à l'échelle territoriale, puis de les appliquer aux collectivités urbaines (communes) du Territoire.

Il présente et met en œuvre les principes généraux d'une *méthodologie simplifiée* intégrant l'établissement du Passif écologique national et sa désagrégation à l'échelle du Territoire. Celle-ci se fonde sur un tableau entrées/sorties (TES) *monétaire* national agrégé, à 14 postes, et l'établissement de son reflet *matériel*, un TES14 *biophysique* complet (industries et ménages) représentant le Passif écologique national, pour ensuite les désagréger tous deux à l'échelle du Territoire. De nombreuses extrapolations sont tirées des passifs écologiques nationaux et territoriaux, dont une *stœchiométrie urbaine*.

Le **chapitre VII** a pour objectif de développer et mettre en œuvre les principes méthodologiques de réalisation du Bilan écologique du territoire, en deux versions distinctes, **A**, *fonctionnelle*, et **B**, *stœchiométrique*, aux objectifs différents.

La section 7.1 expose quelques compléments méthodologiques utiles à la réalisation de la version **A**, *fonctionnelle* du bilan, puis le met en œuvre et le commente. De cette version du Bilan écologique du Territoire seront tirés deux indices fondamentaux, l'indice *d'autonomie territoriale* et l'indice *d'écodéveloppement*.

La section 7.2 formule en introduction le postulat (de l'Anthropocène) fondant la version **B**, *stœchiométrique*, du Bilan écologique, puis expose quelques compléments méthodologiques avant de le mettre en œuvre et de le commenter.

---

### Conclusion générale

---

Celle-ci est déclinée en quatre grands volets concernant, (a) les exigences et le traitement du sujet, (b) les résultats comparés aux enjeux, (c) leur signification et utilité, (d) leurs limites et les perspectives de recherche qu'ils supposent. Elle est conclue (e) par une vue prospective concernant l'exploration et la mise en évidence des valeurs d'un développement vraiment *écologique*, ou *écodéveloppement*.

**Première partie**  
Fondements du **Bilan** *écologique*  
et problématique *globale*

## **.Chapitre I.**

# **Fondements du Bilan écologique, et problématique globale**

*La première partie est constituée du seul chapitre I.*

*Le **chapitre I** a pour objectif de présenter les motivations et le contexte général d'élaboration de notre thèse, de répondre au premier volet de l'interrogation centrale exposée dans notre introduction générale, puis d'introduire la problématique globale relative au second volet de cette interrogation.*

*Il introduit le cadre général du débat des relations homme-nature dans lequel s'inscrit le Bilan écologique, dont il extrait, vis à vis notamment de l'Empreinte écologique, l'autonomie de son assise conceptuelle et son cadre d'analyse et de mesure (réponse au premier volet de l'interrogation centrale).*

*Il approfondit ensuite ce débat et le positionne dans l'histoire des idées pour en extraire les deux composantes de la problématique globale (second volet de son interrogation) à laquelle est confrontée notre thèse.*

## 1.1 Fondements du Bilan écologique

### 1.1.1 A la recherche de l'Écodéveloppement<sup>10</sup>

Présenter une thèse de doctorat après avoir effectué la majeure partie de son parcours professionnel vient à l'inverse de la normale. Et là où une jeune personne a pu prendre un certain nombre de mois pour penser et justifier l'objet de sa thèse, une personne plus âgée a pu prendre un certain nombre d'années pour murir les prémisses et se préparer à affronter les enjeux qui justifieront la sienne. Ce qui fut mon cas. Et il me semble ici pertinent de dire un minimum du contexte personnel de long terme qui l'a motivée au premier chef, tout en m'y préparant.

Ma motivation ne date ni d'hier ni d'avant hier, mais s'est constituée tout au long de la quête, un peu de laboratoire, mais beaucoup plus de terrain, d'une alternative écologique au développement et des moyens de la mettre en œuvre, qui se sera étendue sur une trentaine d'années.

Après avoir passé en 1981 un BTS de Techniques Agricoles et Gestion d'Entreprise (BTS TAGE, INM Clermont Ferrand), j'ai poursuivi en 1982 dans la foulée un BTS en thermodynamique et énergies renouvelables (CCI Nîmes).

Sur ce j'ai été engagé en 1983 comme agent auxiliaire du *Laboratoire d'Etudes Comparées des Systèmes Agraires* (LECSA, INRA, Montpellier), laboratoire pluridisciplinaire dont l'objet était de croiser diverses disciplines (agronomie, zootechnie, foresterie, énergétique, socio-économie) dans un nouveau champ de recherche, *l'analyse énergétique* (Odum, 1971; Pimentel, 1979, 1980; Valette, 1980; Schilizzi, 1982, 1983, 1987), visant l'optimisation énergétique des pratiques agricoles. Le Directeur, A. Conesa, à l'écoute de mes propositions, m'a encouragé à produire, en alternance avec mon travail de recueil de données de terrain en Camargue, deux rapports consécutifs supposés servir de trame d'orientation à un nouveau programme de recherche appliquée, concernant la *valorisation agro-énergétique* des sous produits agricoles (Loiret, 1983a, 1983b).

Mes travaux, qui visaient une optimisation de la *valeur ajoutée* du travail conjoint de la nature et de l'homme, ou *capital fertilité de production* (Reboul, 1978), répondaient pleinement au modèle de développement alternatif à la mondialisation qui était alors à la mode, suite à la première Conférence des Nations Unies pour l'Environnement et le Développement (CNUED, 1972) de Stockholm : *l'Écodéveloppement*. Ceci d'autant que j'avais comme proche collègue de travail un doctorant qui préparait alors sa thèse de l'EHESS sous la direction d'Ignacy Sachs (1979, 2007), le grand vulgarisateur de ce concept aux côtés de Maurice Strong, Président de la CNUED, qui en avait formulé les grands principes. Et ce collègue, d'origine anglo-saxonne, qui avait apporté au laboratoire ses références techniques concernant l'analyse énergétique initiée par Pimentel, ne cessait de pousser mes réflexions dans le sens de l'écodéveloppement.

Comme Monsieur Jourdain, je faisais alors de *l'économie écologique* sans le savoir. Développant mes réflexions à partir des travaux de Pimentel (1979, 1980) et Passet (1979), je ne pouvais en effet savoir que ces derniers, cette année et les suivantes,

---

<sup>10</sup> Nous empruntons ce titre à Ignacy Sachs (2007), le père de l'Écodéveloppement, qui semblait en 2007 avoir perdu son fils. Par ailleurs, tout au long de ce paragraphe personnel, nous passerons sur le mode moins « ampoulé » du « Je ».

participeraient aux premières réunions qui aboutiront en 1988 à la création de l'*International Society for Ecological Economics* (ISEE, Costanza, 2003).

Mais hélas, *la crise* commençant elle aussi à se faire connaître sans que je le sache, les crédits du LECSA furent revus drastiquement à la baisse, et j'ai dû réorienter mon activité professionnelle sur la durabilité plus forte qu'exigeait l'entretien d'une famille nombreuse.

J'ai alors passé dix années entières (1983-1992) plongé dans le monde de l'horticulture de pointe au sein du *Groupe Meilland* (Lyon, Antibes), à l'époque premier producteur mondial de variétés de roses. Elles me donnèrent l'occasion d'approcher les divers métiers du groupe, et surtout, après un Master en Organisation (IESTO- CNAM, Paris), d'attaquer le chantier de sa réorganisation<sup>11</sup>.

J'ai pu ainsi découvrir les différents savoir-faire du groupe, et pour partie intervenir directement (gestion informatisée du climat sous serre, économies d'énergie à grande échelle - les dépenses énergétiques en horticulture sous serre représentent plus de 50% des charges d'exploitation - systèmes d'absorption de CO<sub>2</sub> sous serre, etc.).

Et j'ai pu aussi étudier l'*Organisation* avec un de ses grands praticiens (Bruno Lussato, 1977, 1986, 1987), et ainsi pénétrer ses concepts et pratiquer ses outils essentiels, comme l'*Analyse systémique*, la *Cybernétique des organisations*, la *Recherche opérationnelle* ou la *Théorie de l'information*, qui me seront d'un secours essentiel dans la résolution des problématiques auxquelles me confrontera mon doctorat.

Ceci pour dire, en entrant dans ses prémisses, que je n'aurais jamais pu soutenir le défi posé par la reformulation de mes objectifs de thèse si, après mon année préparatoire à l'INRA de Montpellier, je n'avais passé ensuite nombre d'années confronté à quantités de situations professionnelles *concrètes*, parfois très contradictoires aux logiques de la « soutenabilité », et à chercher les outils susceptibles de nous aider à y répondre. Toutes elles me préparèrent à affronter les questions multiples et complexes que posera l'élaboration d'un bilan des relations homme-nature, et notamment parmi celles-ci la *diversité* biologique.

Mais c'est un nouveau Master, à l'Université de Nice (Unice), dénommé sans beaucoup d'humilité « Gestion de la Planète »<sup>12</sup>, qui devait m'ouvrir en 1994 vers une pratique des problèmes de la soutenabilité à une autre échelle, d'abord auprès de la Commission européenne et ensuite auprès des collectivités territoriales.

Mon mémoire de Master avait porté sur une proposition systémique intégrée de lutte contre le *changement climatique* (Loiret, 1994), et mon stage effectué auprès d'*Europlan*, un Bureau d'Assistance Technique (BAT) de la Commission européenne, spécialisé dans les problèmes d'énergie et d'environnement, m'aura permis de devenir plus tard son directeur technique. Et d'être ainsi initié, outre ses pratiques très « normées », aux multiples catégories de standards et nomenclatures utilisées par la Commission au long des études qu'elle est amenée à commanditer. Ces connaissances me seront aussi d'une grande utilité quand mes travaux de thèse me demanderont de croiser, mettre en correspondance et ponctuellement synthétiser, les diverses nomenclatures exigées par un recueil standardisée des données de l'économie, de l'environnement et des territoires.

---

<sup>11</sup> J'ai été au long de ces dix années tantôt salarié du groupe, tantôt Ingénieur conseil en Organisation auprès de son Directeur.

<sup>12</sup> Ceci quand bien-même son Directeur réunira une commission spéciale chargée d'« enfoncer » mon rapport final de Master, au titre que j'avais entièrement « inventé » (en 1994 !), un concept d'Effet de serre qui ne saurait exister !

Mais cet apprentissage des standards européens ne devait durer que peu de temps, et en 1997, confronté pour raison économique à une période de chômage, j'en profiterai pour faire un stage approfondi au *Laboratoire d'économie physique* du CNRS de Montpellier, spécialisé dans la modélisation des systèmes à énergie totale (Valette, 1980), dans la *production jointe* avec son *Modèle d'Economie Physique et de Prospective* (MEPP, Deflandre et autres, 1987), et plus largement dans la modélisation du développement (Matarasso, 1990). Concepts et outils qui me seront ici aussi d'un secours évident dans la résolution des problèmes de calcul du *passif écologique* d'une collectivité territoriale.

C'est après ce stage que j'entamerai en 1997 la dernière partie de ma pratique professionnelle « pré-doctorale », d'abord auprès d'un Vice-président de la Région Paca, et ensuite au sein de l'Agence Régionale Pour l'Environnement (ARPE) de cette même région. Sans entrer dans les détails, c'est dans ce dernier contexte que je serai confronté cette fois, revenant ainsi à mes sources, à toutes sortes de questions relatives au développement durable et/ou à l'écodéveloppement des territoires régionaux.

Ce « et/ou » parce que, alors que j'étais ponctuellement (2003) en charge de définir la nouvelle politique environnementale de la Région, et notamment les nouvelles missions de l'ARPE, j'ai été confronté à la nécessité de clarifier les différences essentielles entre ces deux concepts alternatifs au développement industriel (Loiret, 2007).

Alors que la Loi du 25 juin 1999 d'Orientation pour l'Aménagement et le Développement Durable des Territoires (LOADDT), dite *loi Voynet*, précisait depuis peu les nouvelles normes d'évaluation des politiques environnementales territoriales, il s'agissait de les transcrire dans la nouvelle politique environnementale de la région.

Mais nos deux modèles supposaient des processus d'évaluation des politiques régionales entièrement différents, le premier (développement durable) s'imposant selon un processus « top-down », centralisé à l'échelle mondiale pour descendre progressivement vers les territoires, le second (écodéveloppement) émergeant à priori d'une demande décentralisée remontant des territoires selon un processus « bottom-up ». C'est lors de l'analyse des potentiels d'évaluation de ces deux formes de politiques environnementales qu'apparurent leurs divergences conceptuelles et structurelles<sup>13</sup>.

Je résoudrai alors ces divergences par un *artifice* selon lequel je proposerai que le Conseil régional soit le porteur de la politique de développement durable, et l'ARPE celui de l'écodéveloppement. L'écodéveloppement devenait ainsi, en attendant mieux, un développement durable spécifique aux territoires, et l'ARPE devenait pour sa part, *mi* officiellement, *mi* officieusement, la première agence française chargée de promouvoir l'écodéveloppement des territoires.

Cette position était mitigée car il s'avèrera dans la pratique presque impossible de faire saisir *concrètement* la différence des deux concepts aux ingénieurs et chargés de mission territoriaux de l'ARPE (une cinquantaine). Seuls les plus anciens, qui avaient comme moi pu saisir les changements de logique des deux CNUED, reprirent cette différence à leur compte pour défendre l'écodéveloppement, quand les autres, environ les  $\frac{3}{4}$ , directeur

---

<sup>13</sup> Ignacy Sachs, Conseiller spécial de Maurice Strong lors des deux CNUED successives qui édictèrent, en 1972 l'Écodéveloppement, et en 1992 le Développement durable, reconnaîtra en 2007 à mots couverts (Sachs, 2007), qu'il y avait des différences essentielles entre les deux modèles, que lui même, forcé par le secret professionnel et la pression diplomatique, avait du « nier » de longues années durant.

compris, optèrent pour le développement durable, qui leur évitait de se mettre en porte à faux avec la Région.

L'ARPE, selon mon avis *personnel*, perdra ainsi le sens de sa nouvelle mission auprès des territoires.

Des ingénieurs, *professionnels de l'environnement*, et comme eux nombre d'écologistes, se trouvaient incapables de saisir cette divergence des modèles alternatifs au développement ; et donc à fortiori la population, pour laquelle leur différence était si « subtile » qu'Ignacy Sachs<sup>14</sup> pourra « subtiliser » l'écodéveloppement au nez et à la barbe de l'opinion publique mondiale.

Cette situation deviendra plus tard la motivation initiale de ma thèse : Par quels outils conceptuels et méthodologiques déterminants pourrais-je rendre explicite pour tous l'écodéveloppement face aux autres modèles alternatifs ?

Cependant, j'aurai entretemps reporté mon attention professionnelle sur les *outils* susceptibles de soutenir un juste modèle écologique de développement territorial, en étudiant les différents *indicateurs de développement durable* (idd) et notamment l'*Empreinte écologique* (Ee), un *indicateur de synthèse* susceptible de nous indiquer les voies territoriales d'une juste « soutenabilité »<sup>15</sup> (Boutaud, 2005).

Après que j'ai établi un premier état de la question (Loiret, 2007), il fut alors décidé que je développerais un programme de calcul de l'Ee de la Région Paca, comme outil de diagnostic, définition et évaluation de ses politiques environnementales. Et c'est suite à mes premiers résultats positifs de désagrégation régionale de l'Ee de la France (Loiret, 2008) qu'il fut convenu d'élargir ce programme aux espaces naturels régionaux dans le cadre d'une convention de recherche doctorale visant à tester l'application de l'Ee à un PNR.

Le *Parc Naturel des Préalpes d'Azur* (PNRPA, 06) deviendra dès lors, début 2010, le territoire pilote d'application d'un nouveau programme collaboratif<sup>16</sup> (EMPR PNRs) qui financera partiellement ma recherche doctorale, et sur la base duquel je formulerai mon projet de thèse, initialement nommé : *Valeur(s) de l'Écodéveloppement*.

C'est ainsi que j'aurai consacré au total trois années, dont deux avant mon doctorat, à la traduction locale du calcul national de l'Ee et à son amélioration (Loiret, 2008, 2011b, c).

Ceci pour finalement aboutir à un constat de carence selon lequel l'Ee ne saurait être ni appliquée aux territoires naturels, ni améliorée en ce sens (Loiret, 2011d).

Mais je ne saurais développer les détails de ce constat sans perdre mon lecteur, comme ce fut trop longtemps mon cas, dans le labyrinthe de ce très vieux débat, toujours actuel, sur *la mesure du travail de la nature*, dans lequel s'est perdu l'Ee.

Il m'a semblé plus pertinent d'en extraire les lignes de force et de positionner dans son contexte, *la recherche d'objectivation des relations homme-nature*, les propositions de l'Ee, ses caractéristiques et ses failles ; puis d'y positionner mes propositions, en montrant leur similitude primitive avec l'Ee, puis finalement leur différence fondamentale.

<sup>14</sup> Précisons que Maurice Strong avait été le président des deux CNUED, et que Sachs en tant que son Conseiller spécial avait porté la réflexion sur le concept et le développement des deux modèles lors de leurs conférences respectives. Je donnerai lorsqu'il en sera temps les raisons de ce changement stratégique d'orientation.

<sup>15</sup> En référence au titre de la thèse de Wackernagel (1994) : *A tool for planning toward sustainability*.

<sup>16</sup> Convention partenariale quadripartite entre le PNRPA, l'ARPE Paca, le laboratoire REEDS et l'association Nord Sud International.

## 1.1.2 De l'objectivation des relations homme-nature

### 1.1.2.1 Un état de la question *introdutif*

Le Bilan écologique (Be), tout comme l'Ee, représente, avec ses composantes, l'actif et le passif écologiques, un point de convergence de diverses disciplines que nous rangerons par commodité dans la famille de l'*économie écologique*.

Du fait de cette diversité, il ne nous a pas semblé opportun de dérouler un état de la question en forme de bloc contextualisant en une seule fois l'ensemble de questions et propositions. Cela saturerait la lecture, et n'apporterait pas pour autant l'éclairage nécessaire à certaines questions, d'autant plus fondamentales qu'elles se trouvent délimitées par un contexte et un champ de questionnement à la fois très pointu et de large portée conceptuelle, au simple exemple du second principe de la thermodynamique.

Nous précisons par ailleurs que la notion d'actif écologique, qui impose une mesure devant pour le moins « rendre compte » du vivant et de la diversité biologique, suppose que cette mesure soit applicable à toutes les échelles du vivant, de la molécule élémentaire à l'ensemble de la Biosphère. Vouloir en un seul bloc faire le tour de la question de la mesure du vivant depuis l'émergence des sciences naturelles pourrait ainsi terriblement compliquer notre état de la question.

Pour ces raisons au moins, nous tracerons tout d'abord, dans un bref état de la question *introdutif*, un schéma simplifié de l'histoire et du contexte de recherche d'*une mesure commune au travail de la nature et à l'économie*, dans lequel ont baigné, depuis la Physiocratie jusqu'à l'Économie écologique, nombre de démarches d'analyse des relations homme-nature, et à fortiori l'Ee et le Be, qui s'inscrivent dans la même lignée de questionnement.

Ce schéma simplifié aura, pour cette première section, les objectifs suivants :

- Tracer un cadre d'explicitation unifié de cette interrogation centrale à laquelle l'Ee fut confrontée, et que nous avons repris à notre compte,
- Contextualiser et rendre compte à l'intérieur de ce cadre des carences de l'Ee, en forme de schéma conceptuel de synthèse éclairant ses différentes critiques,
- Présenter contradictoirement à partir de ce même schéma l'assise conceptuelle autonome du nouveau BE que nous proposons,
- Rendre ainsi plus explicite, en sous niveau de la problématique commune, le champ plus spécifique des problématiques auxquelles nos propositions nous confrontent.

Sachant que dans la seconde section de ce chapitre nous approfondirons cette problématique en centrant progressivement l'attention sur le *Mur du vivant*, soit les problèmes fondamentaux posés par une mesure thermodynamique de l'ordre de la nature et du désordre induit par l'économie.

Nous approfondirons de la même manière chaque fois que nécessaire cet état de la question *introdutif* dans les sections ultérieures.

### 1.1.2.2 De la nature de la Nature, et de la valeur de son travail

#### a) Cadre originel du débat

Pendant des siècles le modèle de la *Cité* avait fonctionné (entre hauts et bas), le désordre généré par son développement très progressif étant supposé absorbé dans le

chaos de la nature extérieure, cette nature étant alors, et de toute façon, considérée sans limites.

Et au pire, ce désordre était absorbé par des pratiques agricoles qui depuis des générations avaient intégré, serait-ce sans les « objectiver », les vertus fertilisantes des déchets végétaux et animaux de toutes sortes que la cité d'alors produisait (recyclage organique).

Puis, la population se développant, l'esclavage et le servage disparaissant, la pression foncière s'intensifiant, les facteurs de production se raréfiant, ..., les premiers économistes (de la Cité, bien longtemps après ceux de l'Oïkos) sont apparus pour commencer à raisonner, quantifier et gérer (objectiver donc) l'articulation des rapports entre la cité et son monde extérieur.

On a souvent dit que ces défricheurs considéraient eux aussi la nature comme inépuisable, et ses ressources sans limites. Mais il n'en est pas exactement ainsi.

Quesnay (1694-1774) et les Physiocrates ayant préalablement formalisé les relations entre la fertilité des terres agricoles et les flux de matière pénétrant la cité, Ricardo (1772-1823) formulera ainsi son opinion au sujet de ces ressources :

Par les principes ordinaires de l'offre et de la demande, il ne pourrait être payé de rente pour la terre, par la même raison qu'on n'achète point le droit de jouir de l'air, de l'eau, ou de tous ces autres biens qui existent dans la nature en quantités illimitées. Moyennant quelques matériaux, et à l'aide de la pression de l'atmosphère et de l'élasticité de la vapeur, on peut mettre en mouvement des machines qui abrègent considérablement le travail de l'homme<sup>17</sup>; mais personne n'achète le droit de jouir de ces agents naturels qui sont inépuisables et que tout le monde peut employer. De même, le brasseur, le distillateur, le teinturier, emploient continuellement l'air et l'eau dans la fabrication de leurs produits ; mais comme la source de ces agents est inépuisable, ils n'ont point de prix. Si la terre jouissait partout des mêmes propriétés, si son étendue était sans bornes, et sa qualité uniforme, on ne pourrait rien exiger pour le droit de la cultiver, à moins que ce ne fût là où elle devrait à sa situation quelques avantages particuliers. C'est donc uniquement parce que la terre varie dans sa force productive, et parce que, dans le progrès de la population, les terrains d'une qualité inférieure, ou moins bien situés, sont défrichés, qu'on en vient à payer une rente pour avoir la faculté de les exploiter. Dès que par suite des progrès de la société on se livre à la culture des terrains de fertilité secondaire, la rente commence pour ceux des premiers, et le taux de cette rente dépend de la différence dans la qualité respective des deux espèces de terre [Ricardo, 1817].

Si pour Ricardo les ressources naturelles étaient à priori illimitées, et sans valeur, ce n'était donc qu'à l'exception des terres défrichées, qui acquéraient une valeur du fait de leur productivité différentielle (rendements décroissants), avec la pression foncière et les rentes de situation qui en résultaient.

Du seul moment où elles entraient sous le contrôle de la cité, ceci donnait donc à ces terres une limite, l'usure de leur productivité, et une valeur, en raison de cette usure.

Cette usure en effet ne résultait pas du hasard de l'histoire, mais de ce que Marx (1818-1883) nommera *L'accumulation primitive du capital*<sup>18</sup>, fondatrice de la révolution agricole anglaise (approximativement 1727-1850) puis de la révolution industrielle. Comme il l'a fait ressortir dans son analyse du « secret » de cette accumulation (*Le Capital*, huitième section), c'est un processus qui se fonda non pas tant sur l'appropriation

<sup>17</sup> Ricardo anticipait là les futures réflexions de Carnot (1824) et Clausius (1865) sur « la puissance motrice du feu ».

<sup>18</sup> Elle aurait débuté en Angleterre à la fin du XV<sup>ème</sup> siècle, pour se poursuivre, par étapes, jusqu'au début du XIX<sup>ème</sup> siècle.

(sanguinaire) des terres des petits paysans que sur l'appropriation de leur productivité différentielle, leur richesse, due à l'accumulation du travail « conjoint » de la nature (humus...) et de l'homme, au long des siècles précédents. Travail nature-homme accumulé dans le sol que Marx constatera et que Claude Rebol (1987) nommera *Capital fertilité de production*.

Et c'est du fait de l'épuisement de ces terres, après qu'elles furent démembrées et surexploitées, notamment en Ecosse, par le développement outrancier des troupeaux de moutons (production de laine, ensuite tissée dans les filatures des banlieues de Glasgow et Londres, en voie d'industrialisation), que les grands propriétaires terriens anglais, devenus *capitalistes* (*Le Capital*, huitième section), demandèrent à leurs savants de se pencher sur les causes de ce phénomène, qui à leur échelle n'était alors pas du tout « rationalisé »<sup>19</sup>.

Après la grande époque du mercantilisme, fondé sur la rareté de l'or, une nouvelle rareté apparaissait, que les physiocrates avaient identifiée<sup>20</sup>. Ce qui positionnait primitivement l'économie comme une science des relations entre la cité, le capital et certaines propriétés spécifiques du monde extérieur ; et ce qui amena les premiers économistes à « estimer » que l'ordre, interne, de la cité, soit son capital emmagasiné (mobilier et immobilier), était en proportion directe d'un ordre, externe, propre aux terres agricoles, caractérisé par la quantité, en voie de raréfaction, de son capital fertilité emmagasiné.

Ainsi, loin de considérer « toutes » les ressources naturelles comme inépuisables, ces nouveaux savants d'une science émergente commencèrent au contraire à les rationaliser, mais du seul moment où l'époque commençait à trouver, dans les propriétés des terres sous contrôle, certaines *limites*, qui anticipaient de 200 ans le rapport Meadows (1972) sur les limites de la croissance.

Il s'agissait d'en comprendre l'origine : d'où venait la disparition des qualités productives du sol ? Cela supposait de comprendre, scientifiquement s'entend, le phénomène de la fertilité.

Ceci fit l'objet d'un très grand débat. Sigaut (1975), nous raconte comment les travaux de l'abbé Rozier (1734-1793), un expert agronome qui avait publié un *Cours complet d'agriculture* qui fit alors le tour de l'Europe, alimentèrent entre l'Angleterre et la France, dès l'orée de sa Révolution, une vive et longue controverse (1780-1840), qui rend compte

---

<sup>19</sup> Bien au contraire, comme nous le révèle le cas de *l'accumulation primitive française* (note suivante), plus explicite encore car plus concentrée dans le temps, le processus fut fondé non seulement sur l'appropriation des sols et de leur capital fertilité, mais sur sa transformation directe en capital financier, c'est à dire sans retour à la terre de la part de la rente nécessaire à la reproduction de sa fertilité ; à savoir que les nouveaux propriétaires fonciers ne procédèrent pas (ou très peu) à l'amendement des sols, la fertilité de ceux-ci étant alors considérée, dans leur « naïf appât du gain », comme inépuisable. Exactement comme il en a été de nos jours pour les énergies fossiles, avant les différentes crises de l'énergie.

<sup>20</sup> Notons à ce propos que, au cours de recherches antérieures à notre thèse, nous avons identifiée l'existence d'une accumulation primitive « française » du capital, parallèle à celle de l'Angleterre, mais « concentrée » sur une période temporelle beaucoup plus courte (environ 1640-1720) ; elle aurait eut lieu à St Domingue (Haïti), débutant lors de sa prise de contrôle par Nicolas Fouquet (il sera vice-roi d'Amérique), et continuant sous le contrôle direct de Louis XIV, après que Colbert ait emprisonné Fouquet (1661) et confisqué ses biens. C'est instruit de cette expérience que Louis XIV « aurait » confié sur son lit de mort à son petit fils, futur Louis XV, que le secret de toute richesse se trouve dans la « terre noire » (l'humus). Ce qui serait probablement à l'origine des recherches de Quesnay et des *économistes*.

de l'ampleur du débat de l'époque quant à la compréhension des origines de la productivité agricole.

Les travaux de l'abbé Rozier, qui avait repris à son compte les théories de Quesnay et De Saussure sur la fertilité des sols, et qui était soutenu dans ses théories et expériences pratiques par Rousseau (*La nouvelle Héloïse* !), s'inscrivaient au point d'articulation entre la fin du contexte français d'existence du Romantisme et de la Physiocratie, et la montée en puissance de l'économie et de la science rationnelles qui devaient faire suite aux Lumières.

Tandis qu'au XIXe siècle écrivains et poètes, à la suite de Rousseau, inscrivent l'être humain dans une Nature maternelle, les sciences la réduisent et la découpent en physique, chimie, biologie [Morin, 2011:80].

Parfaite traduction physique de ce moment, qui prendra un tour dramatique pour l'environnement, cette controverse opposait les vertus fertilisantes de l'humus (produit du compostage/enfouissement des sous-produits), via la capacité des végétaux à absorber le jus nourricier de l'*humus soluble*<sup>21</sup>, aux vertus de l'écobuage (brûlis des sous-produits agricoles), via la capacité des végétaux à absorber les minéraux fournis par les cendres issues de l'écobuage.

Voici la vision que le chimiste allemand Justus von Liebig (1803-1873) avait du problème, avant que ses propres travaux n'entrent dans la balance :

Durant le dernier quart du siècle écoulé, on ignorait complètement, en agriculture, la cause de la fertilité des terres cultivées, de même que celle de leur épuisement. A part leur besoin de soleil, de rosée et de pluie, le cultivateur ne savait pour ainsi dire rien des conditions nécessaires au développement des plantes. Quant au sol, on lui attribuait souvent pour unique rôle celui de soutien [...] On se figurait que le sol ressemble à une machine reproduisant elle-même constamment elle-même la force qu'elle a dépensé pour le travail, dès qu'on lui restitue une certaine fraction de ses produits. [...] La force que la terre avait dépensé pour la production du fruit pouvait, supposait-on, lui être restituée par le repos et par le fumier [...] On croyait que le fumier d'étable devait ses effets à une propriété particulière, incompréhensible, que l'art était incapable de produire. Cette propriété était communiquée aux aliments de l'homme et des animaux durant leur passage à travers l'organisme. [...] Mais ce que cette force propre du sol était en réalité, on l'ignorait totalement. Plus tard, on s'imagina que cette force propre du sol devait résider dans un véhicule et que ce véhicule était l'humus. On désignait ainsi une certaine matière combustible d'origine organique, difficile à définir d'une manière bien claire, une espèce de fumier qui se produisait sans le concours des animaux. On croyait en conséquence que les rendements plus ou moins grands des champs étaient en rapport direct avec la quantité plus ou moins grande d'humus qui s'y trouvait, et que la quantité d'humus pouvait être augmentée dans un champ tant par le fumier d'étable que par une exploitation conduite avec intelligence [Liebig, 1862].

Et cette controverse ne devait s'éteindre, après 1840, que lorsque Liebig, se fondant sur les découvertes de Boussingault concernant les capacités de nutrition minérale des végétaux, vérifiera la *loi des rendements décroissants* de Ricardo<sup>22</sup>, et détruira la théorie humique de la nutrition végétale (Waksman, 1936). Après quoi la fertilisation par l'humus fut progressivement remplacée par la nouvelle agriculture chimique<sup>23</sup>.

---

<sup>21</sup> Liebig (1862) et Waksman (1936), attribuent à De Saussure cette théorie que l'abbé Rozier avait reprise à son compte.

<sup>22</sup> Marx (1867:660) nous dit que Ricardo n'a fait que la mettre en harmonie avec la théorie générale de la valeur, et qu'elle fut énoncée par l'agronome écossais James Anderson à l'époque d'Adam Smith. Reboul (1987:91) nous dit quant à lui que c'est à Turgot qu'elle doit revenir, qui l'énonça en 1767, sans toutefois prononcer le mot « loi ».

<sup>23</sup> Chose extraordinaire, ce concept de fertilité en rapport avec l'humus était toujours rejeté par l'INRA en 1983. Alors que nous étions assistant au LECSA (Laboratoire d'Etude Comparée des Systèmes Agraires), INRA,

Hasard de l'histoire, c'est dans les moments même où cette controverse s'éteignait que Marx et Engels, dans le cours de leurs nombreux échanges (à partir de 1844), reprenaient à leur compte la question de l'origine de la fertilité. Poussant plus avant que Ricardo la question de la valeur des sols défrichés, estimant que la valeur-travail accumulée dans les sols était le résultat « conjoint » du travail de la nature et de celui de générations de paysans, Marx conclura ponctuellement :

... chaque progrès de l'agriculture capitaliste est un progrès non seulement dans l'art d'exploiter le travailleur, mais encore dans l'art de dépouiller le sol ; *chaque progrès dans l'art d'accroître sa fertilité pour un temps, un progrès dans la ruine de ses sources durables de fertilité*. Plus un pays, les Etats-Unis du Nord de l'Amérique par exemple, se développe sur la base de la grande industrie, plus ce procès de destruction s'accomplit rapidement. La production capitaliste ne développe donc la technique et la combinaison du procès de production sociale qu'en épuisant en même temps les deux sources d'où jaillit toute richesse : La terre et le travailleur [Marx, 1867:363].

Ce qui anticipait parfaitement le concept de la  *cité*  comme  *structure dissipative*  !

Mais ayant posé le problème, Marx allait reconnaître qu'il se trouvait incapable de le résoudre. En ces moments où avec Engels ils dressaient leur critique radicale du système, ils étaient en effet tous deux, dans le même temps, des scientifiques convaincus, au fait de toutes les découvertes et avancées de leur époque, comme en témoignent les travaux d'Engels sur la Nature (Engels, 1883) et l'admiration (serait-elle mesurée) de Marx pour des scientifiques à l'image de Liebig :

C'est un des mérites immortels de Liebig d'avoir fait ressortir amplement le côté négatif de l'agriculture moderne au point de vue scientifique [Marx, 1867, note 246 du chapitre XV, p.660].

Ainsi, alors même qu'ils avaient ensemble toutes les raisons et tous les moyens intellectuels de s'impliquer au cœur de la controverse, une très étonnante « limite », entre leur capacité d'analyse et leur capacité d'action, allait les mener à déclarer forfait de concert.

Le fonctionnement intrinsèque du système capitaliste, tel qu'ils estimaient pouvoir le décrire, excluait selon eux la reproduction du facteur naturel, et ceci notamment parce que :

La nature produit des valeurs (plus-values) dont ne saurait rendre compte le système comptable du modèle capitaliste [Marx, 1867].

Pour résoudre ce problème, Marx estimait qu'il fallait pouvoir exprimer les rapports économiques dans les unités de mesure de la physique. Mais Engels le convaincra que c'était absolument impossible :

Dans un lettre du 19 décembre 1882 adressée à Marx, Engels insiste longuement sur les travaux d'un certain Podolinsky dont, selon lui, "la très importante découverte" consiste en la démonstration que "le travail humain est capable de retenir et de prolonger l'action du soleil à la surface terrestre au-delà de ce qu'elle durerait sans ce travail", mais à qui il reproche cependant ce que lui-même considère comme "absolument impossible", "de vouloir exprimer des rapports économiques dans les unités de mesure de la physique" [...] Engels, en effet, estime qu'en raison de l'entropie, il est impossible que l'homme produise en travail plus de Kcal qu'il en absorbe. La plus value ne peut donc être démontrée de cette façon [Passet, 1979:184].

Montpellier, dirigé par le futur responsable d'Agropolis (Montpellier), ce n'est qu'en ressortant des « oubliettes » de l'INRA la fameuse synthèse sur l'humus de Selman A. Waksman (Prix Nobel de physiologie en 1952, inventeur de la streptomycine, et père du concept d'antibiotique), que nous avons pu commencer à le faire prendre en compte. Waksman (1936) y démontrait, en se référant à 1500 études scientifiques et résultats de recherche antérieurs, comment l'humus concentre le pouvoir fertile de la nature, serait-ce en distribuant aux plantes les éléments minéraux dont elles ont besoin selon une « combinaison optimale ».

Cette impossibilité exprimée par Engels, telle que l'interprète ici René Passet, a fait depuis lors l'objet d'un débat incessant quant aux capacités du marxisme à intégrer les valeurs de l'écologie (Martínez Alier & Naredo, 1982 ; Burkett, 2006 ; Burkett & Bellamy Foster, 2008, 2011 ; Pellegrini, 2012 ; Rodríguez de Austria Giménez de Aragón, 2014).

Débat fort justifié, car après la controverse de l'abbé Rozier, les restrictions d'Engels face aux propositions de Podolinsky prendront une importance symbolique, et auront des conséquences considérables dans l'histoire de l'économie politique, marxiste et écologique.

Nous reprendrons nous-mêmes à la source, dans la deuxième section de ce chapitre, les éléments fondamentaux de ce débat ; ils nous aideront à faire émerger et contextualiser les composantes de la problématique globale posée à notre thèse.

C'est en effet sur le fondement des affirmations d'Engels au long de leurs échanges, que Marx se trouvera réduit à n'attribuer de valeur aux marchandises que sur la seule base de la valeur-travail de l'homme. Ce qui ramènera la question de la fertilité à la seule question des intrants artificiels (azote, phosphore, ...) et autres « outils fabriqués par l'homme », ceci renforçant finalement les fondations d'une théorie de la valeur-travail selon laquelle :

La valeur de toute marchandise, y compris d'origine agricole, est déterminée par la quantité de travail directement fournie par les travailleurs pour la produire, mais aussi par le travail indirect qui a dû être effectué pour produire les outils et machines utilisés [Ricardo, 1817].

Marx et Engels s'étaient ainsi trouvés dans l'incapacité de contredire, ou pour le moins temporiser, au moment le plus crucial de l'entrée de l'Occident dans la modernité, les théories d'un homme (Liebig) qui contribuèrent au premier plan à la révolution agro-industrielle et à la mondialisation du capital. Mais plus encore, à partir desquelles leurs successeurs en ligne directe, Lénine et surtout Staline, pourront, dans le sillage, voire le sillon, de leurs assertions « limitées », déclencher la *Tragédie des cinq épis*<sup>24</sup> (Werth, 2011), qui mettra la paysannerie traditionnelle de l'Ukraine et du Caucase sous coupe rangée des Kolkhozes et Sovkhozes et jettera dans la famine la totalité de leurs populations. Reproduisant ainsi sans vergogne, en une vingtaine d'années, au pas de charge et au prix de millions de victimes, exactement ce même processus d'accumulation primitive du capital qu'il avait fallu deux cents ans à l'Angleterre pour accomplir, ...

... et que Marx avait « si bien » analysé et critiqué !

Ainsi prit fin la première tentative visant à imputer une valeur au travail de la nature, dans le cadre d'un débat qui, depuis lors, sera relancé et passablement bouleversé !

## **b) Translation du regard sur la Nature**

Dans le mouvement d'arrière fond de tous ces drames, et du jour où fut « évacuée » par Liebig la limite au rendement décroissant des terres agricoles soulignée par Ricardo, que s'est-il passé ?

---

<sup>24</sup> Cette tragédie débuta le 7 novembre 1929, à partir de l'article de Staline, publié dans la Pravda du même jour, et intitulé Le grand tournant, dans lequel il annonçait sa décision de mettre enfin en œuvre la collectivisation de l'agriculture.

\* Les recherches de la nouvelle science s'organiseront<sup>25</sup>, sous tendues par le capital accumulé, autour du développement des nouveaux outils d'optimisation de la productivité des sols, avec la consommation correspondante de ressources naturelles.

\* La terre agricole, sauf rentes de situation particulières (les grands vignobles, ...), sera ainsi de plus en plus objectivée et ramenée à l'état de simple outil<sup>26</sup>, support de plus en plus neutre<sup>27</sup>, de tous les autres outils/machines que l'homme s'adjoindra pour son exploitation.

\* Ces outils étant produits, par le travail des hommes, grâce aux ressources naturelles externes au domaine de la cité, considérées, elles, comme inépuisables, et donc sans valeur, il n'y aura désormais plus aucune limite à l'extension de ce domaine.

\* Ce domaine s'étendra de plus en plus largement jusqu'aux (et à l'intérieur des) anciennes frontières de la nature, et la cité s'étendra au prorata de son domaine.

\* La nature selon Rousseau, le pays d'Héloïse, proche de l'oïkos en bien des aspects, disparaîtra purement et simplement. Et nous, citoyens modernes, porterons plus loin notre regard, pour trouver une nouvelle nature à regarder et fantasmer (voire conquérir), en même temps que le débat sur les limites se reportera sur elle.

\* De la seule reproductibilité des conditions de fertilité des sols, le problème basculera sur la reproductibilité de la Nature elle-même, au sens le plus large.

Et ceci jusqu'à ce que la production agricole (et forestière) d'origine, une fois ramenée à la dimension (industrielle) d'une simple annexe de la cité (une dépendance de son domaine), ne devienne plus qu'une consommation de travail humain et de ressources naturelles.

Ces dernières étant sans statut, car hors contrôle et hors champ économique ; ce qui pose de fait, une nouvelle fois, mais à une échelle globale cette fois, la question de la valeur du travail de la nature (de ses services écosystémiques).

Cette translation du débat sur la valeur de la nature, avec le passage des terres agricoles du statut de producteur à celui de consommateur, a complètement bouleversé le regard du citoyen sur la nature de la Nature qu'il embrasse dans ce concept. Caractériser cette translation s'avèrera primordial, nous le verrons, pour « désigner » les bons opérateurs de comparaison ordre-désordre du bilan des relations homme-nature, et de ce fait, la juste soutenabilité.

### c) Cadre actuel du débat

Le *Modèle du Monde* de Forrester (1971) et le rapport Meadows sur *Les limites de la croissance* (1972), puis cette même année la première CNUED de Stockholm <sup>28</sup>, nous informaient, et toutes les autorités mondiales avec nous, il y a déjà près d'un demi-siècle, des limites, nouvelles

---

<sup>25</sup> Le laboratoire de recherche de Liebig aurait été le « premier » à être pensé et architecturé comme tel.

<sup>26</sup> Là où Liebig avait dit : « *On se figurait que le sol ressemble à une machine...* », il deviendra le tout premier contributeur mondial de la transformation effective des sols en machines.

<sup>27</sup> Nous en avons appris quelque chose, ayant travaillé au plus haut niveau au sein du Groupe *Meilland*, inventeur de la culture hors sol.

<sup>28</sup> Notons que dans le même temps Nicolas Georgescu-Roegen (1971) publia sa contribution capitale, *La loi de l'entropie et le processus économique*, qui devait constituer un pilier des nouvelles dynamiques d'analyse économique sur lequel fut bâtie l'économie écologique. Cette publication simultanée « aurait » été concertée (Levallois, 2010).

pour l'économiste, que la planète impose à notre consommation et au modèle de croissance dominant.

En 1980, William Catton, dans *Overshoot*, nous avertissait que nous avions d'ores et déjà outrepassé la *capacité de charge* de la Terre. Et son pronostic était si sombre que nous devions, immédiatement, faire quoi que ce soit pour

... garantir que le crash inévitable consiste aussi peu que possible en une pure et simple extinction massive de l'homo sapiens [Catton, 1980].

Puis il y a eu la CNUED de Rio, en 1992, et son nouveau concept de « développement soutenable », qui anticipait de peu le premier rapport du Panel International (de scientifiques) sur le Changement Climatique (GIEC-IPCC, 1995), à partir duquel nous admettrons (très progressivement) son origine humaine, prendrons la menace plus au sérieux, et verrons se succéder les conférences internationales sur le sujet.

Mais sans que pour autant, à l'échelle globale s'entend, la réalité change en quoi que ce soit !

Le problème est aujourd'hui que, 25 ans plus tard, le développement soutenable est encore un concept universel, mais n'est pas un concept s'imposant à une réalisation pratique de tous les jours. C'est la considération du groupe de plus haut niveau du Secrétariat Général des Nations-Unies, dont le leader est le Président de la Finlande T. Halonen [Kuznetsov & Bolshakov, 2013].

Les prévisions, indicateurs, clignotants, ... puis catastrophes de toutes sortes montrant au contraire que la situation empire d'année en année (IPCC, 2001, 2007, 2013).

Avec la montée en puissance de la crise, le débat aura ainsi basculé des seules limites productives des sols aux limites de la Nature au sens le plus large. Mais à ce jour, malgré les apports certains de la nouvelle Physiocratie, l'*Economie écologique*, il n'a toujours pas été résolu dans ses fondements premiers.

Retrouvant dans l'opposition de l'écologie au libéralisme l'ancienne opposition du Romantisme aux Lumières, notre incapacité à résoudre le clivage paradigmatique entre valeur du travail de la nature et valeur du travail de l'homme, nous renvoie toujours et encore à ce débat *tragique*, parce que sans solution, qui aura vu la fin de l'Oïkos<sup>29</sup>. C'est toujours à la même question, mais cette fois à l'échelle toute entière de la Biosphère, que nous confrontent désormais les limites de nos capacités, ... et de notre volonté.

### 1.1.3 De la mesure du travail de la Nature ...

Mais qu'est-ce que la Biosphère ? Un demi siècle avant que James Lovelock, nouveau *vitaliste*, développe son *hypothèse Gaïa* (Lovelock, 1979), Wladimir Vernadsky (1929), dans le sillon des grandes avancées naturalistes et évolutionnistes du XIXe siècle, avait développé le métaconcept *biogéochimique* d'une entière fabrication des *compartiments thermodynamiques* de notre surface terrestre (atmosphère, hydrosphère, lithosphère) par la matière vivante et les organismes vivants (d'où une bio sphère). Et ceci, tout au long de l'évolution, via une dynamique cyclique de déplacement de la masse, constante, des espèces chimiques, intégrant et entraînant ordre et désordre (fonctions redox des cycles

---

<sup>29</sup> Le cœur du *débat tragique*, déjà cité, entre Eschyle et Sophocle, aurait traduit cet ordre d'opposition sans solution des grands *paradigmes de vision du monde* qui aboutira à la domination de l'oïkos (Vernant, 1974). Martin Bernal (1987) a cherché à décrypter cette confrontation, depuis l'ancienne Grèce jusqu'à nos jours, des deux grands paradigmes qui ont baigné la civilisation méditerranéenne des origines.

biogéochimiques) dans un nouveau sens<sup>30</sup> de cette évolution : sa *directionnalité énergétique* (Lotka, 1922 ; Vernadsky, 1930 ; Sewertzoff, 1930 ; Loiret, 2012a, 2013a).

Et de laquelle Vernadsky déduira, à la suite des travaux d'Henri Le Chatelier sur l'équilibre chimique (1886), et de Josiah Willard Gibbs sur l'équilibre statistique et l'énergie libre (Gibbs, 1902), dans une « apparente » contradiction au second principe de la thermodynamique, le concept d'*énergie géochimique des organismes vivants*, ou *énergie biogéochimique*, dont la production les éloigne de l'équilibre thermodynamique. Par lequel il anticipait, là encore d'un demi-siècle, *l'exergie*, qui caractérise l'énergie libre incorporée dans la matière par l'action du vivant ; c'est à dire un des concepts les plus prometteurs concernant la mesure de la biodiversité aux dires de la CBD (2010).

Il donnera ainsi à l'écologie les fondements d'une discipline à part entière, qui viendra en appui direct de cette translation de regard qui avait vu s'opérer tout au long du XIXe siècle une évolution générale des sciences académiques participant du nouveau cadre d'objectivation de la Nature.

La nouvelle Physiocratie devait naître un peu plus tard. Sa première manifestation daterait de la lettre de Sergueï Podolinsky (1880) communiquée à Engels (Martínez Alier & Naredo, 1982), et que Vernadsky, son compatriote, avait positivement commentée (Vernadsky, 1924). Ses questionnements passeront ensuite dans l'arrière plan, dans la tourmente des révolutions industrielles et socialistes puis des grandes guerres mondiales. Jusqu'à ce que le débat sur les limites de la nouvelle Nature se fasse plus évident, dans les années du rapport Meadows (1972), et que la prise de conscience des risques soit plus partagée à l'échelle mondiale. Alors les approches économiques et naturalistes, divergentes depuis des décennies, convergeront de nouveau pour fonder, tout au bout du long parcours de réflexion sur les rapports entre société urbaine et production agricole<sup>31</sup>, la nouvelle discipline fille de la Physiocratie, l'Economie écologique.

Cutler J. Cleveland (1999) nous a offert une très utile synthèse de (la version « anglo-saxonne » de) cette évolution du champ d'analyse et des concepts, entre Physiocratie et Economie écologique, où, reprenant à leur compte les grands principes de la thermodynamique, des chercheurs comme Robert Ayres, Fred Cottrell, Herman Daly, Robert Costanza, Bruce Hannon, Howard T. Odum, Nicholas Georgescu-Roegen, Frederick Soddy, ... et Cleveland lui même, ont établi des lois, mis au point des principes de mesure et modèles de calcul, de plus en plus opératifs et significatifs, de l'ordre énergétique et matériel de la Nature, et de sa consommation/dégradation par l'économie ; et ce jusqu'à la révélation du concept d'*exergie* (Wall, 1977 ; Szargut et autres, 2005 ; Valero, 2008).

Mais synthèse dans laquelle aura manqué cruellement, entre la Physiocratie et l'Economie écologique, certes l'éclairage de Waksman (1936), mais surtout celui de Vernadsky et de la nouvelle école biogéochimique<sup>32</sup> (que nous nommerons au chapitre suivant : « Ecole - ou courant - de la directionnalité de l'évolution ») ; éclairage qui, faisant le pont entre biologie, énergie, géologie, physique statistique et thermodynamique, fonde

---

<sup>30</sup> En référence au sens entropique de l'évolution, tel que désigné par le second principe de la thermodynamique.

<sup>31</sup> Platon, dans *Les Lois*, dans *La République*, entamait déjà cette réflexion.

<sup>32</sup> Il existe de nos jours toute une école, notamment en Russie et aux USA (NASA), de chercheurs ayant repris ses principes fondateurs pour mieux appréhender le « vivant » dans les, et en dehors des, différents champs de la Biosphère. Nous y reviendrons.

une valeur conceptuelle du travail de la Nature parfaitement corrélable aux grandes lois de l'évolution, du vivant, ... et de la biodiversité.

Soit un manque, ou un trou, phénoménal dans tous les cas, qui aura passablement « faussé » la chronologie historique du développement épistémologique de l'écologie et de l'économie écologique. Cela constitue une raison assez fondamentale pour qu'au chapitre suivant, nous comblions certains trous, cherchions à recoller les morceaux éparpillés, redressions tant soit peu l'arbre généalogique, et tentions de reconstituer une histoire des idées seule à même d'éclairer certains points vitaux de notre problématique globale.

#### 1.1.4 ... au bilan des relations Homme-Nature

L'économie écologique avait cependant tellement évolué de son côté que, dans le milieu de la décennie 1990-2000, il a semblé possible d'établir un véritable bilan des relations homme-nature, qui intégrerait les résultats de ces recherches dans un cadre de calcul globalisé ; et qui, signifiant les relations étroites entre causes et effets, permettrait enfin de passer à l'action correctrice.

Et c'est juste après que la Conférence de Rio (CNUED, 1992) ait formulé ses conclusions autour du nouveau *développement soutenable*, que William Rees (1992) et Mathis Wackernagel (1994) ont conçu puis développé un tel bilan au moyen du concept d'Empreinte Ecologique (Ee).

Après avoir problématisé les différentes facettes (écologiques, socioéconomiques, politiques, épistémologiques, psychologiques) de la crise de soutenabilité, Wackernagel formule ainsi ses objectifs dans sa thèse de doctorat :

L'objectif de cette thèse est de développer plus avant et tester un outil de planification qui puisse aider à la transformation de la crise de soutenabilité en action publique. Comme outil de planification pour conceptualiser et développer la soutenabilité, le concept d'« Empreinte Ecologique » [...] est proposé [Wackernagel, 1994].

Ce sur quoi, explorant les conditions nécessaires de la soutenabilité et les besoins de planification pouvant transformer ces conditions en actions effectives, il développera les principes fondateurs de l'Ee, qui rend compte d'un concept de développement soutenable limpide et didactique, selon lequel, toutes populations planétaires confondues, nous ne saurions consommer la *biocapacité* de plus d'une planète ; puis qui calcule le nombre de planètes que, de l'individu à telle collectivité, nous consommerions si chaque habitant de la planète avait le même niveau de consommation que nous. Ce qui offre l'avantage certain de donner une image immédiate de notre excès.

Sur ces bases, il établira plus tard, au sein d'un organisme dédié, le Global Footprint Network (GFN), une méthodologie de calcul aux standards très élaborés (GFN, 2009), à partir de laquelle sera établie, aux échelles nationales, puis agrégée à l'échelle planétaire (GFN, 2004-2011), pour le compte du WWF monde, l'Ee des nations (WWF, 2002-2011).

Les publications du GFN furent depuis, vis à vis de cette soutenabilité, une opération de communication parfaitement réussie. L'Ee a en effet connu un tel succès d'*estime* international que le *2012 Blue Planet Prize* a récompensé ses concepteurs, Rees et Wackernagel, pour avoir développé « *un système de comptabilité compréhensif de comparaison entre la demande humaine envers les écosystèmes, et les capacités d'auto renouvellement de ces écosystèmes* ».

Grâce à l'Ee, qui permet de « constater » les limites planétaires, le développement soutenable promulgué en 1992 était, 20 ans plus tard, enfin devenu ... compréhensible !<sup>33</sup>

Mais sans connaître pour autant le succès attendu !<sup>34</sup> En 2011, soit une année avant la consécration du succès de l'Ee, deux sociologues de l'environnement, proches de Catton (1980), constataient pour leur part que nous étions entrés dans un nouvel âge des crises économiques et environnementales, où les contradictions entre constat des limites écologiques et comportement social, devenaient de plus en plus flagrantes. Et ils se demandaient combien de temps encore l'homme, occidental surtout, continuerait à ignorer les signes, évidents, de son potentiel collapse :

Alors que les océans s'élèvent, que la température se réchauffe, que l'eau fraîche diminue, que les forêts disparaissent, que les espèces s'éteignent, que les énergies fossiles ont atteint leur pic de production, que des catastrophes comme Fukushima, ou l'explosion de Deepwater Horizon atteignent des ampleurs nationales, des tentatives seront-elles faites pour freiner sérieusement la consommation ? Sinon, que faudra-t-il de plus pour attirer l'attention à long terme du public ? » [Schultz & York, 2011].

Faisant le même type de constat, la même année, Edgard Morin, dans la parfaite continuité de Lynn White Jr. (1967), ira encore plus en profondeur dans l'identification des causes d'une telle fracture, qu'il nomme la *Grande disjonction d'Occident* (Morin, 2011).

### 1.1.5 L'Empreinte écologique : une faille récurrente

#### 1.1.5.1 Critique globale de l'Empreinte écologique

Dans l'euphorie de son succès, l'Ee a concentré sur elle l'attention des politiques, des environnementalistes et des chercheurs en économie écologique, ce qui a amené une concentration corrélative de la critique internationale.

Nous concentrerons pour notre part notre attention sur deux grandes synthèses de cette critique, venant de spécialistes de l'Ee particulièrement fondés à les établir. L'une concernant les aspects conceptuels et méthodologiques, l'autre concernant la portée internationale, la réception et l'utilité constatée de l'Ee auprès des différentes parties prenantes de son utilisation.

En 2006, Jason Venetoulis et John Talberth, deux anciens partenaires de Wackernagel, avec il a originellement travaillé, au sein de l'ONG Redefining Progress (Oakland, USA), sur la première formulation d'un bilan nommé *EFA*<sup>35</sup>, ont introduit leur critique de la manière suivante :

En dépit d'une popularité croissante de l'EFA, des problèmes définitionnels, théoriques et méthodologiques entravent son acceptation scientifique et son usage plus répandu dans les stratégies politiques [Venetoulis & Talberth, 2006].

---

<sup>33</sup> Ce qui est dire à quel point l'écodéveloppement ne l'avait pas été !

<sup>34</sup> Venetoulis et Talberth (2006) recensent nombre d'applications volontaires privatives qui ont été faites de l'EE, mais c'est à l'échelle des collectivités territoriales qu'elle failira, nous verrons pourquoi. C'est entre 1992 et 2012 environ, que la Chine a connu pour sa part un développement qui, débordant par une immense vague la « Cité interdite », a dépassé tous les records climatiques !

<sup>35</sup> Venetoulis & Talberth (2006) insistent sur la grande différence entre l'EE « en soi », qui mesure notre consommation, et l'EFA (Ecological Footprint Analysis), qui établit la comparaison entre cette consommation et la *biocapacité* des territoires pris en compte, et nous donne une mesure de la soutenabilité. Soit un bilan entre passif et actif écologiques pour lequel nous avons adopté dans notre thèse le terme explicite de « Bilan écologique ».

Puis ils ont développé leur critique en partant des ambiguïtés entre les définitions différentes de l'Ee données par Wackernagel :

Wackernagel et Loh (2002) : L'Empreinte écologique est une mesure de combien de terre productive et d'eau un individu, une cité, un pays, ou l'humanité a besoin pour produire les ressources qu'elle consomme et pour absorber les déchets qu'elle génère, en utilisant les technologies disponibles [Ibid.].

Wackernagel et autres (2005) : Les comptes de l'Empreinte écologique calculent combien de la capacité régénérative de la biosphère nous avons besoin pour renouveler la consommation de ressources d'une population définie pour une année donnée [Ibid.].

Pour aboutir aux failles méthodologiques de l'Ee expliquant cette ambiguïté :

(a) Exclusion des océans ouverts et des terres moins productives des comptes de biocapacité, (b) Incapacité d'allocation d'espaces pour les autres espèces (biodiversité) (c) Utilisation d'un modèle de productivité agricole « mécaniste » comme base des facteurs d'équivalence (EQF) (d) Allocation douteuse du budget carbone global (e) Faillite à rendre compte de l'utilisation insoutenable des écosystèmes aquatiques et terrestres [Ibid.].

Puis en 2010, Tommy Wiedmann et John Barrett, qui ont eux aussi travaillé sur les approfondissements méthodologiques de l'Ee (Wiedmann & Barrett, 2005), ont établi une synthèse mondiale des critiques de nature plus « institutionnelle », à partir d'une enquête très approfondie qui a porté sur 50 parties prenantes internationales de l'Ee, et plus de 150 articles. Reprenons le seul résumé de cette synthèse :

Les points clefs identifiés dans l'enquête sont que l'Ee (a) est vue comme un outil de communication puissant (b) a un rôle limité dans le contexte politique (c) est limitée en portée (d) doit être plus étroitement associée au système des Nations unies de comptes économiques et environnementaux (e) est plus utile comme partie d'une batterie d'indicateurs [Wiedmann & Barrett, 2010].

Nous pourrions approfondir ces critiques, mais cela n'apporterait rien de plus à notre analyse, qui ne s'adosse ici à l'Ee que comme à un modèle ambitieux dont les carences seront susceptibles de caractériser une faille récurrente de la Physiocratie, même renouvelée.

Dans l'euphorie de cette nouvelle soutenabilité proposée par l'Ee, nous avons passé nous-même plusieurs années (dont deux avant le début de notre recherche doctorale), à mettre en œuvre son calcul au niveau d'une Région française (Paca) (Loiret, 2008), appliquant, dans une opération pilote nationale, les principes méthodologiques très sophistiqués de sa désagrégation nationale à l'échelle des sous territoires (Wiedmann & Barrett, 2005 ; Loiret, 2012b) ; puis plus tard à démonter pièce par pièce ses différents rouages pour tenter d'améliorer des défauts sans cesse émergents (Loiret, 2011).

Ceci jusqu'à ce que nous comprenions, après avoir remonté toute la hiérarchie des concepts ayant présidé à sa mise au point (Rees, 1992 ; Wackernagel, 1994), que l'Ee nous avait ramenés, certes au constat de Quesnay sur la dépendance entre richesse naturelle et richesse matérielle de la cité, mais surtout à celui de Ricardo sur les limites de la productivité.

Ce dernier constat ne serait pas en soi un problème si le développeur de l'Ee, revenant ainsi aux sources fondatrices de l'économie, et se confrontant lui aussi à cette

*impossibilité*<sup>36</sup> exprimée par Engels (1882) à Marx, ne l'avait résolue (a) en ignorant la nouvelle nature de la Nature (b) en abandonnant toute tentative de mesure du son travail intrinsèque (c) en s'adossant finalement, tout comme Marx, aux concepts de ... Liebig !<sup>37</sup>

### 1.1.5.2 De l'ignorance de la vraie nature de la Nature ...

Rees, concepteur de l'Ee, regardant la consommation des grandes cités mondiales face à l'Ecosphère<sup>38</sup>, avait parfaitement positionné le problème ordre-désordre :

... la réalité thermodynamique nous apprend que l'économie est entièrement soutenue par une énergie et une matière de basse entropie produite "extérieurement" par les écosystèmes et les processus biophysiques. Ainsi, toute production économique est actuellement consommation - les flux de matière et d'énergie écologiquement dépendants traversant l'économie sont unidirectionnels et irréversibles. Ce dernier facteur est crucial pour toute tentative de comptabilité des effets écologiques de quelque process économique que ce soit, y compris le développement urbain. Sans référence au flux entropique " ... il est virtuellement impossible de rapporter l'économie à l'environnement ", pourtant le concept est " ... virtuellement absent des sciences économiques aujourd'hui " [Rees, 1992].

Après quoi il avait introduit la notion de *capital naturel*, pour la relier ensuite à celle de *capacité de charge* (des écosystèmes) :

... quelques économistes ont accepté l'argument écologique que la soutenabilité dépend de la conservation de certaines entités et processus biophysiques. Ces " ressources " maintenant les fonctions de support de vie (life-support) de l'écosphère, les risques associés avec leur déplétion sont inacceptables et il n'y a pas de substituts technologiques. La discipline hybride émergente de l'économie écologique regarde ainsi de tels actifs comme une classe spéciale de " capital naturel ", et a avancé un critère de « stock constant de capital » comme condition nécessaire du développement soutenable [...] Le concept de capital naturel peut facilement être relié à celui de capacité de charge. Les écologistes définissent la " capacité de charge " comme la population d'une espèce donnée qui peut être supporté indéfiniment dans un habitat donné sans causer de dommages permanents à l'écosystème dont ils dépendent. Pour les êtres humains, la capacité de charge peut être interprétée comme le niveau maximum de consommation de ressources et de rejet de déchets qui peut être soutenue indéfiniment dans une région donnée sans impacter progressivement sur l'intégrité fonctionnelle et la productivité des écosystèmes dépendants [Ibid.].

Rees avait ainsi déroulé un enchaînement logique entre capital naturel et capacité de charge, dont il s'agissait ensuite de trouver *la juste mesure*, sans se perdre entre les deux.

Et Wackernagel reprendra cette logique pour l'introduire dans sa thèse, en deux temps distincts. Premier temps, la définition de l'objectif spécifique de son outil de soutenabilité :

La première tâche de notre outil devient de mesurer *le capital naturel* et les flux que nous tirons de lui [Wackernagel, 1994:62].

Une mesure qu'il croit devoir, après avoir énoncé fort à propos les différentes raisons pour lesquelles l'analyse monétaire ne saurait le faire, traduire en une mesure

---

<sup>36</sup> Compte tenu des débats dont la réaction d'Engels (1882) aux travaux de Podolinsky (1880) fait encore aujourd'hui l'objet, nous serons amenés à étudier plus loin cette *impossibilité* avec grande attention.

<sup>37</sup> Ce qui, avec le terme « Empreinte *écologique* », aura induit en erreur des milliers d'écologues à travers le monde, nous en premier.

<sup>38</sup> La figure page suivante nous donnera un tout premier éclairage du sens et des relations Biosphère-Ecosphère-Anthroposphère.

physique du capital naturel. Un type de mesure dont H.T. Odum (1983, ...1996) avait tracé, avec l'*Emergie*, un sillon remarquable.

Et deuxième temps, la traduction de cet objectif en une mesure *biophysique* nouvelle :

Dans ce but, cette thèse avance plus avant un concept de comptabilité écologique qui utilise la surface de sol comme son unité de mesure biophysique. Cette approche part de l'hypothèse que chaque catégorie majeure de consommation ou de décharge (déchets) exige la capacité productive ou absorptive d'une surface finie de terres ou d'eau. Le cumul de la demande de terres de toutes ces catégories procure un agrégat, ou surface totale que nous appelons "l'Empreinte Ecologique" d'une économie définie de la planète. Cette surface représente la capacité de charge qui est "appropriée" (ou occupée) par cette économie pour fournir le flux total de biens et services [Ibid.:67].

Notre chercheur subdivisera cette surface à agréger de la demande en terres, en quatre grandes catégories d'usage des sols : 1 - Les terres consommées (surfaces construites), 2 - Les terres actuellement utilisées (forêts gérées, pâturages, terres arables, ...), 3 - Les surfaces terrestres fantômes (océans et forêts incontrôlées susceptibles d'absorber les émissions de CO<sub>2</sub>), et 4 - Les terres de validité limitée (autres espaces naturels et déserts).

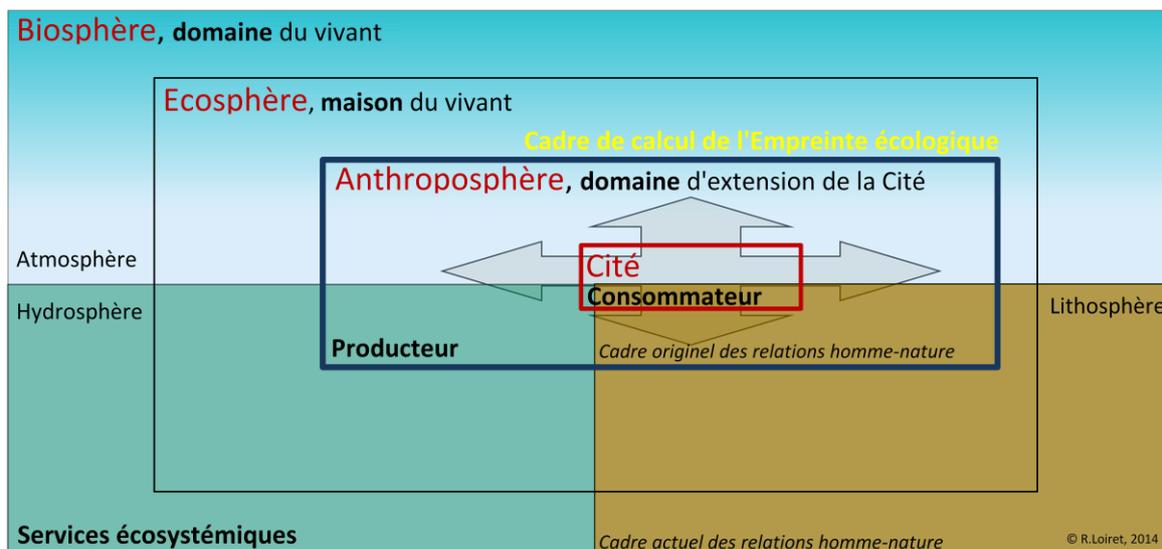
A partir de quoi il affectera les différentes consommations d'un pays donné à une sous catégorie d'usage (le bois à la forêt, les céréales aux terres arables, la viande aux pâturages, ...) et à une quantité surfacique nouvelle, l'*hectare global* (gha), sa mesure *biophysique*. Ce dont il procède (a) en attribuant, au rendement surfacique moyen mondial en tonnes de chaque sous catégorie, via des *facteurs d'équivalence*, une quotité de gha, c'est à dire des surfaces d'intensité productive variable reflétant leur *productivité différentielle* (b) en transformant les différentes consommations spécifiques de chaque pays en proratas de gha d'une sous catégorie mondiale.

Quant aux produits industriels, comme les matières composites et les machines, trop complexes pour être « surfacisés », ils seront simplement traduits en énergie totale (directe et indirecte) consommée, puis en proratas d'émissions de CO<sub>2</sub>, et finalement en gha de terres fantômes.

Ayant ainsi obtenu l'empreinte spécifique, soit *l'Ee en soi* d'un pays, en termes d'impact total de sa consommation mesurée en gha de surface terrestre, il la comparera finalement (EFA) à sa *biocapacité spécifique*, soit sa surface disponible, en gha, au prorata du rendement moyen spécifique (*facteurs de rendement*) de chaque sous catégorie de surface.

Ceci étant exposé, observons la figure suivante<sup>39</sup> :

Figure 1 : Nature naturelle et cadre de calcul de l'Empreinte écologique



Sans entrer dans les détails, toutes les catégories de surface (y compris maritimes) recensées par l'EFA sont catégorisables (comme avec la nomenclature Corine Land Cover - CLC) sur la ligne horizontale centrale de cette figure.

Mais parmi celles-ci, ne seront effectivement prises en compte, en gha de *biocapacité*, que celles ayant une productivité (annuelle) significative, dont la mesure sera donnée par leur rendement en tonnes, un critère dicté par les usages les plus courants de la cité.

Il résultera de cette règle que : (a) Les surfaces dites « fantômes », comme les forêts non gérées, ne sont pas prises en compte pour leur production, mais au seul titre de leur capacité à absorber le CO<sub>2</sub>, c'est à dire les déchets de la cité (b) Les surfaces terrestres dites de *validité limitée*, soit tous les autres espaces naturels, ne sont pas prises en compte dans l'EFA.

Ce qui veut dire en d'autres termes que ne sont reconnues comme « productives » que les capacités de l'*Anthroposphère*<sup>40</sup>.

Et ce qui signifie aussi que tout autre flux annuel de production (les énergies fossiles sont considérées comme un stock non renouvelable), soit la valeur du travail de la

<sup>39</sup> Pour certains auteurs, l'ordre Biosphère - Ecosphère adopté dans cette figure est inversé. Nous étudierons l'ordre ici retenu, et les termes associés, dans notre paragraphe consacré au père de la Biosphère (Vernadsky, 1929) et à son école. Notons que cette représentation rectangulaire simplifiée prendrait à l'échelle planétaire une forme sphérique.

<sup>40</sup> A la description *primitive* de la Cité, nous ajouterons dans une vision actuelle tous ses services annexes déployés au long des siècles par le développement des différentes *tekhne* (ou *technè*), et l'assimilation progressive de l'*Oïkos* (note 1), qui originellement appartenait à la seule sphère *privée* des Grecs, avant même qu'ils deviennent des citoyens. Ce qui l'a fait sortir de ses remparts pour intégrer dans son *domaine* toutes les industries primaires, secondaires et tertiaires, dont les industries agricoles et alimentaires, participant directement de son existence et de sa pérennité (avec leurs surfaces d'implantation correspondantes). Dans cette description moderne, l'Oïkos, strict interface entre Cité et Nature, a complètement disparu pour laisser place au système industriel, y compris agricole et forestier, aux frontières beaucoup plus floues, et où seuls ne subsistent comme derniers témoins de sa présence, que les jardins et paysages champêtres, dans tous les cas sous contrôle de la Cité. Nous nommons cette cité étendue l'*Anthroposphère*.

*Biosphère* et de l'*Ecosphère* (la valeur des services écosystémiques), couvrant dans la *figure 1* l'espace au delà du rectangle bleu, est « **exclu** » des comptes de l'Ee<sup>41</sup>.

Wackernagel dira notamment à propos de l'oxygène :

Les bassins d'oxygène ne sont pas pris en compte dans ce modèle de calcul parce que l'air est principalement un « transporteur » facilitant les flux d'énergie et de matière, mais non une source de production écologique primaire [Wackernagel, 1994:82].

Ceci aura pour effet d'exclure entièrement de son « modèle » cet aspect de *producteur écologique primaire* du couple Biosphère/Ecosphère, et de *strict consommateur* de l'Anthroposphère, que Rees avait non seulement souligné :

Ainsi, toute production économique est actuellement consommation [Rees, 1992].

Mais sur lequel il avait insisté :

En termes écologiques, la cité est un nœud de pure consommation fonctionnant de manière parasitaire sur une base externe extensive de ressources. Et en termes écologiques et thermodynamiques, toute « production » matérielle est consommation [Ibid.].

Partant comme Marx et Engels d'une problématique de *mesure du capital naturel*, Wackernagel aura ainsi, tout comme eux, très probablement conclu par une « impossibilité », mais *sans le dire* <sup>42</sup> !

Et il l'aura finalement réduit, tout comme eux, à la seule mesure d'une productivité des sols agricoles selon Ricardo et Liebig ; tout en opérant pour sa part une translation inverse à celle que nous avons mis en relief quant au cadre du débat sur la nature de la Nature, c'est à dire en faisant un bond de 150 ans en arrière !

Si nous réexaminons la *figure 1*, qui traduit en découpage sémantique la réalité géophysique de l'expansion de la cité et la translation du débat production/consommation, nous comprendrons maintenant que ce repli, non explicite mais pourtant « constaté », sur *le cadre originel du débat*, fausse entièrement la question d'un *consommateur* qui redevient, avec lui, *producteur*, éclipsant ainsi, de fait, en même temps que les remarques de Rees, la véritable nature du capital naturel.

Cela explique maintenant toutes les critiques de Venetoulis et Talberth (2006), sachant que les critiques institutionnelles qui suivront (Wiedmann & Barrett, 2010), y compris celle de la CBD (2005), ne forment pour leur très grande majorité qu'un effet de cette cause primitive. Et cela explique aussi la contradiction des définitions de l'Ee de 2002 et de 2005, soulignée par ses deux anciens partenaires.

Toutes les critiques mondiales adressées depuis plus de huit ans à l'Ee révèlent ainsi une même et unique cause originelle : l'adoption d'un découpage des paramètres du bilan (EFA) comparant Ee et biocapacité (l'empreinte de quoi ?, la biocapacité de quoi ?), qui a éclipsé la véritable nature de la Nature, soit le travail de la Biosphère et de l'Ecosphère.

---

<sup>41</sup> Et comme nous le verrons plus loin, quelque biodiversité que ce soit !

<sup>42</sup> Constat non explicite, et silence, volontaire ou non, dans tous les cas *trompeur*, auxquels nous devons pour notre part, dans l'ordre : d'avoir méconnus les enjeux primitifs de notre thèse, qui visait à estimer l'Ee d'un espace naturel, d'avoir trompé nos partenaires initiaux sur les capacités de l'Ee, d'avoir dû travailler 5.000 heures de plus pour rattraper ses failles, ..., mais au final, quand même, il faut le dire, d'avoir fondé l'autonomie complète de notre thèse et d'avoir travaillé sur un des sujets les plus vitaux et passionnants de la civilisation quant à ses rapports à la Nature, ... en espérant avoir apporté quelques réponses « utiles ».

Wackernagel aura ainsi ramené le bilan écologique tant attendu à un quasi exercice d'économie agricole ou d'*analyse énergétique*<sup>43</sup>, sauf à caractériser la productivité différentielle par les gha, et à l'étendre aux échelles nationales et mondiales.

Ce qui nous ramène aux raisons pour lesquelles, malgré l'insistance de son concepteur, mais (à priori) avec son assistance, le développeur de l'Ee a adopté un tel découpage, débouchant sur un bilan, certes agricole et global, mais qui n'a plus d'écologique que le nom. Et ce qui, après le cadre conceptuel de ce bilan, introduit plus précisément sa seconde dimension, le type de mesure adopté.

### 1.1.5.3 ... jusqu'au au Mur du vivant !

La mesure commune aux deux facettes de l'EFA, l'hectare global (gha), est fondée, côté actif (biocapacité) - soit la productivité de l'Anthroposphère (hors structures industrielles<sup>44</sup>) - sur des *facteurs d'équivalence* (EQF) d'échelle mondiale, dont les ratios de base sont fournis par la base de données GAEZ (Global Agro-Ecological Zones) de la FAO (<http://www.fao.org/nr/gaez/fr/>).

La grande intelligence de ces facteurs EQF est de traduire la *productivité différentielle* des sols en surfaces « intensives » (gha), quand la surface est d'ordinaire une mesure « extensive »<sup>45</sup>.

Mais, comme l'ont critiqué les anciens partenaires de Wackernagel (Venetoulis & Talberth, 2006), ces facteurs se fondent sur une définition *mécaniste* (productiviste) de l'aptitude culturelle des zones agro-écologique globales (GAEZ), à laquelle se sont toujours refusés les écosystèmes naturels, depuis les tous premiers questionnements sur la valeur du travail de la Nature !

Les surfaces (et à fortiori les volumes) de la Biosphère et de l'Ecosphère, extérieures à l'Anthroposphère, ne sauraient donc être statistiquement recensées dans une base de données qui ne prend en compte les surfaces terrestres qu'au titre d'un modèle qui les ignore !

Ainsi le serpent s'est mordu la queue et la solution mécaniste, aussi ingénieuse soit-elle, est devenue un piège ; il était impossible de mesurer selon son principe quelque productivité que ce soit des espaces *hors Anthroposphère*, par définition hors du contrôle de la cité, ... et de son système de mesure. Wackernagel a ainsi parfaitement illustré les dires de Ricardo selon lesquels *n'a de valeur que la terre sous contrôle de la cité*.

Nous nous retrouvons finalement, non seulement avec une surface planétaire strictement limitée à l'Anthroposphère, mais avec une mesure productive de ses surfaces qui

<sup>43</sup> Mais comme l'a exprimé Schilizzi (1983), spécialiste de l'analyse énergétique : « Trop souvent, dans la littérature, l'on voit des auteurs établir des bilans énergétiques de systèmes de cultures ou de systèmes de production sans que l'on sache toujours de quel bilan énergétique il s'agit. Il semble, à lire de tels travaux, qu'il suffit de compter les calories à l' "entrée" et à la "sortie" du système pour qu'on puisse ensuite aussitôt passer à l'établissement de "ratios" et à l'étude d'efficacités énergétiques plus ou moins bien définies. Or l'expression de "bilan énergétique", au mieux manque singulièrement de précision, au pire n'existe tout simplement pas [...] Les physiciens - plus exactement les thermodynamiciens - ont clairement montré qu'il fallait, au moins, distinguer entre "bilans enthalpiques" et "bilans exergetiques" ». Ce qui introduit toute la différence entre l'énergie du bilan de Wackernagel et l'exergie, qui intègre le concept de dégradation "entropique" de l'énergie, à niveau énergétique constant.

<sup>44</sup> Comme nous l'avons déjà dit, la comptabilisation complexe de la production industrielle est assurée via ses seules émissions de CO<sub>2</sub>.

<sup>45</sup> Nous avons étudié cette question des grandeurs *extensives* et *intensives*, aux sources de la thermodynamique, dans notre cahier de recherche n°2 (Loiret, 2013a) ; nous la reprendrons dans le cours de notre thèse.

ne rend compte en rien, comme nous l'avons vérifié (Loiret, 2011c, 2012a), de ces concepts d'humus et de fertilité biologique, véritable *ordre* de la Nature issu de son travail, que Rousseau et l'abbé Rozier après Quesnay tenaient tant à caractériser ... et Marx avec eux !

Mieux encore, il est apparu impossible d'établir à partir des calculs du GFN (1999, 2010), une relation quelconque entre cette productivité différentielle des terres *utiles* et leur contenu accumulé en ressources externes (énergie, engrais, ...) provenant des espaces naturels. Ce qui interdit toute analyse de leur *efficacité énergétique*<sup>46</sup>, après soustraction de leurs consommations externes, puis tout agrégat de ces consommations, et au final toute mesure d'impact de cette consommation de ressources naturelles sur « *l'intégrité fonctionnelle et la productivité des écosystèmes dépendants* » (cf. fin de la seconde citation de Rees, paragraphe 1.1.5.2).

A partir de quoi nous nous trouvons réduits à constater que le développeur de l'Ee a failli à accomplir le premier objectif de son outil (Wackernagel, 1994, p.62) : « *La première tâche de notre outil devient de mesurer le capital naturel et les flux que nous tirons de lui* ».

Tout en étant son objectif, ... ce n'est pas son objet !<sup>47</sup>

Ce qui nous renvoie à la seconde case du *Jeu de l'Oie*<sup>48</sup> ! L'Ee n'aura pas rendu compte de la nouvelle nature de la Nature, et à fortiori n'aura pu mesurer ce que nous en consommons ; avec elle, la nouvelle Physiocratie, aura retrouvé, une case plus loin, la grande limite de l'ancienne, cette impossibilité qu'Engels avait signifiée à Marx.

Impossibilité, en rapport avec l'entropie, sur laquelle Rees, après Engels, avait particulièrement insisté, et qui nous renvoie à la question toujours en débat d'une mesure (thermodynamique) du vivant, rendant compte de la fertilité et de la diversité biologiques, qui serait opposable à l'économie.

Nous nommerons *Mur du vivant* cette problématique complexe qui a interdit jusqu'aujourd'hui toute mesure « solide » du travail de la nature.

Elle était en rapport au « vrai » facteur limitant de la vie humaine.

---

<sup>46</sup> Ce qui contrevient complètement aux principes de l'Economie écologique, fondée pour Joan Martínez-Alier (1982) et Nicolas Georgescu Roegen (1971) sur le constat (de l'analyse énergétique) selon lequel « ... du point de vue économique, la productivité agricole a augmenté, alors que l'efficacité énergétique de l'agriculture a chuté, comme David Pimentel et d'autres chercheurs l'ont montré » (Pellegrini, 2012). En 1994, l'analyse énergétique avait, depuis Pimentel, largement développé ses méthodes, notamment en agriculture (Pimentel, 1979; Odum, 1986 ; ...). Nous approfondirons cette question au paragraphe 1.2.1.

<sup>47</sup> Cette distorsion entre objectif annoncé et objet constaté de l'EE a donné lieu à de nombreux malentendus et faux discours. A l'exemple significatif du Blue Planet Prize, qui a récompensé les concepteurs de l'EE, Rees et Wackernagel, pour avoir développé « *un système de comptabilité compréhensif de comparaison entre la demande humaine envers les écosystèmes, et les capacités d'auto renouvellement de ces écosystèmes* » ; ceci quand jamais, sauf à parler d'écosystèmes « artificiels », l'EE ne travaille cette question, ... à la grande différence, par exemple, d'un H.T. Odum (1986, 1991, 1996), avec son concept d'*Emergie*.

<sup>48</sup> L'Oie sauvage (geb) était en Egypte l'animal symbole du « Neter » de la Terre (geb), soit de la « Nature ».

#### 1.1.5.4 Le « vrai » facteur limitant de la vie humaine

Wackernagel (1994:73-74) avait introduit dans sa thèse la question du facteur limitant « clef » de la vie humaine, en tant que ressource rare dont l'humanité se devait, avant tout autre facteur, de contrôler la reproduction.

Abordant la question d'une mesure *biophysique* de ce facteur, il avait tout d'abord regardé la question de l'*analyse énergétique*, et il avait argué, à la suite d'Herman Daly (Daly et Umaña, 1980), que le postulat des théoriciens de l'énergie, comme quoi l'énergie est le dénominateur commun de toutes les ressources rares, est irréaliste. Tout aussi irréaliste que les économistes et leur analyse monétaire, quand ils postulent une substituabilité infinie du capital à la rareté des ressources.

Car les études de ces spécialistes de l'analyse énergétique, qui rapportent tous les flux d'énergie terrestre aux radiations solaires, focalisent leur attention sur un facteur qui n'est pas en soi limitant. Le « vrai » facteur limitant de la vie humaine était en fait pour Wackernagel l'*énergie biochimique* qui peut être accumulée par l'écosphère (vivante), et non la lumière solaire qui tombe sur terre.

Sur quoi il prenait l'exemple d'une petite plante qui serait le seul organisme croissant sur un hectare de désert du Sahara. Elle serait probablement, écologiquement aussi bien qu'économiquement, moins « signifiante » qu'un hectare de forêt tropicale, même si ces deux surfaces reçoivent le même flux solaire.

Une analyse avec laquelle nous sommes pour notre part tout à fait en accord.

Sauf que, citant les grands pionniers de l'analyse énergétique, à l'exemple de Podolinsky (1880) et Lotka (1922), Wackernagel nous montrait qu'il les avait mal lus, parce que ces deux auteurs, justement, n'avaient centré leur attention que sur les capacités d'accumulation énergétique des sols agricoles et des systèmes vivants.

Ils avaient attiré l'attention de leur époque sur une question, l'origine réelle et la constitution des stocks d'énergie de la Nature, qui ne cessera d'être fouillée et débattue aux débuts du XXe siècle, au point de fonder l'existence de l'écologie globale.

Wackernagel, quant à lui, avait apporté au problème du facteur limitant clef, parfaitement identifié, sa solution *biophysique* (les gha) certes très « brillante », mais non moins « bancale ».

Etait-elle l'œuf de la poule ou la poule de l'œuf ? Toujours est-il que, limitée de fait par l'emprise « sémantique » de son bilan (l'Anthroposphère), son unité de compte ne prenait aucunement en compte l'Ecosphère (comme nous l'avons montré figure 1), et ne rendait compte à fortiori de cette question de l'énergie « biogéochimique » des organismes vivants « de l'Ecosphère », qu'il avait lui-même si judicieusement soulevée.

Une question, certainement la plus importante du XXIe siècle, qu'il avait traitée en quelques pages au prétexte de son astuce (les gha), quand nombre de grands physiciens, chimistes, géologues, biologistes évolutionnaires, et thermodynamiciens qu'a connus le XXe siècle passèrent dessus leur vie entière.

Cette question pour le moins « mérite » que nous-mêmes, à partir de la section suivante, nous la traitions avec toute l'amplitude et le sérieux qui se doivent, en rendant compte des questions telles qu'elles furent posées, du débat qui s'en suivit, et des solutions qui leur furent apportées, ... il y a déjà « 90 ans ».

Se posera alors la question du mystère par lequel elles ne furent pas, et ne se trouvent toujours pas, à notre connaissance, prises en compte par les spécialistes

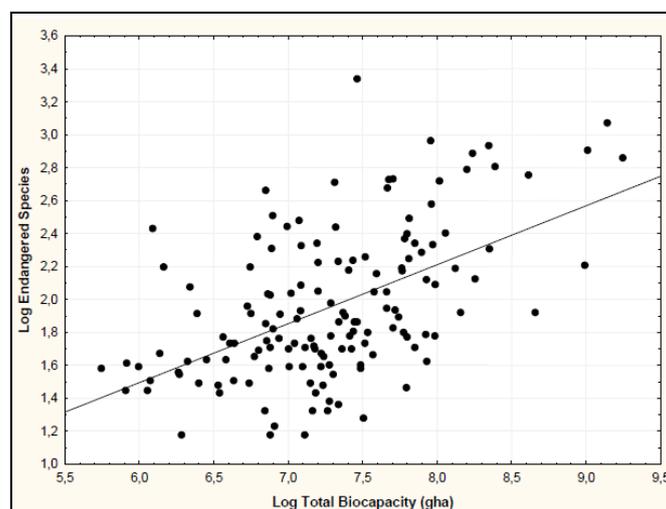
concernés, avec toute la mesure de l'ampleur du nouveau « paradigme scientifique » qui les accompagnait (ou précédait). Nous chercherons à l'élucider.

### 1.1.5.5 En contradiction finale avec la biodiversité

Nous n'avions pas précisé qu'avec l'adoption de son unité de compte (gha) fondée comme nous l'avons vu sur une mesure *mécaniste* de la productivité agricole, soit une fertilité strictement *économique*, il adviendra que l'Ee, d'une part intégrera négativement le développement de l'agriculture et de la fertilité *biologique* (l'extension des surfaces en agrobiologie baisse le niveau de la biocapacité en gha), et que d'autre part, outre le fait qu'elle ne rend pas compte de la diversité biologique, l'Ee deviendra contradictoire à cette dernière (Loiret, 2011d, 2012a).

Comme nous le montre ce graphique de synthèse des résultats d'une étude sur l'Ee et la biodiversité en République tchèque, la *biocapacité* (actif) augmente dans le même sens que les espèces en danger, soit à l'inverse de la *biodiversité* (Vackar, 2008). Ce qui devient vraiment étonnant pour une biocapacité censée « mesurer le capital naturel »<sup>49</sup> !

Figure 2 : Les contradictions entre biocapacité (empreinte écologique) et biodiversité



Relation entre la biocapacité et le nombre d'espèces en danger, utilisé comme une approximation de la biodiversité (source : Vackar, 2008).

Cette contradiction motivera finalement la critique de la Convention pour la Diversité Biologique (CBD), dont nous reprenons ici la conclusion finale de son étude consacrée à l'Ee et la biodiversité (nous gardons volontairement cette citation dans sa langue originelle) :

Due to the complexities of consumption patterns and its direct and indirect consequences on the natural capital, ecological footprint analysis is unlikely to provide an accurate measure of ecological unsustainability... With a view to assessing progress in the sustainability of human use of biodiversity, it would be desirable if existing concepts could focus directly on the impacts of economic activities on biodiversity [CBD, 2005].

Ainsi l'Ee s'avérait maintenant un outil inadéquat pour la mesure de l'*insoutenabilité écologique*, ou dit à l'inverse, inadéquat pour nous indiquer la juste voie de la soutenabilité

<sup>49</sup> Souvenons nous que c'était pour Wackernagel la première tâche de son outil.

écologique, ce qui devenait cette fois contradictoire au tout premier des objectifs de la thèse de Wackernagel, au delà de la première tâche de son outil (mesurer le capital naturel) :

L'objectif de cette thèse est de développer plus avant et tester un outil de planification qui puisse aider à la transformation de la crise de soutenabilité en action publique [Wackernagel, 1994].

A moins que la soutenabilité écologique selon la CBD n'ait rien à voir avec la soutenabilité selon l'Ee !?

Ce point demande à examiner, comme nous le ferons plus loin, ce que dit la CBD quant à la relation entre Biodiversité et Développement soutenable.

Dans tous les cas, après son incapacité à mesurer le capital naturel, l'Ee devenait un outil en contradiction avec l'objectif ultime de notre thèse : la production d'un outil permettant d'identifier et caractériser les valeurs de l'*écodéveloppement*, ou si l'on préfère, les valeurs d'un développement *écologique*.

La production effective de cet outil venait justifier cette fois, d'une manière quasi « ontologique », le changement d'orientation de notre recherche doctorale et le réajustement de nos objectifs.

#### 1.1.5.6 Difficultés de la déclinaison territoriale d'un concept mondialisé

L'Ee a été développée, juste après Rio, selon un processus *Top down*, selon lequel cet outil se devrait de répondre aux nouvelles valeurs du *Développement soutenable*, définies à l'échelle mondiale, afin de permettre leur déploiement territorial, en descendant de strate en strate du niveau international jusqu'à l'échelle locale.

C'est ainsi le concept global qui était censé déterminer l'outil susceptible d'en rendre compte.

Mais ce concept, dès l'origine de sa formulation, a été reconnu comme trouble et ambigu (Boutaut, 2005), notamment en regard de l'*Écodéveloppement*, concept chapeau de la conférence antérieure de Stockholm (CNUED, 1972) (Berr, 2008, Sachs, 2007).

Rees (1992) et surtout Wackernagel (1994), se sont ainsi trouvés dans la position difficile, à la fois de devoir préciser un concept *mondialisé*, et d'en rendre compte dans un outil susceptible de le décliner et le rendre applicable à l'échelle *territoriale*.

Ce qui aura engendré des contradictions structurelles entre le concept et son outil.

Pour notre part, nous procéderons à l'inverse. Nous chercherons par le biais de l'outil, le bilan écologique, et de sa logique spécifique, comment caractériser concrètement, à l'échelle territoriale, un développement véritablement *écologique*, avant même que d'en définir des valeurs et concepts, flous car non vérifiés par le terrain, seraient-ils mondialisés, qui viendraient nous surdéterminer depuis les niveaux supérieurs (top down).

Ainsi l'Ee, depuis ses premières formulations, à partir de 1994, apparaissait finalement comme un outil de communication parfaitement réussi, mais dont le système de mesure échouera à accomplir ses objectifs initiaux.

L'Ee ne pouvait de ce fait identifier les relations structurelles de cause à effet, les relations d'« utilité », qui s'établissent entre la capacité des écosystèmes naturels à offrir certaines ressources, et leur consommation anthropogénique.

Et ceci en concordance avec les organisations internationales, qui de leur côté n'avaient pas alors identifié les outils et programmes permettant d'établir ces relations, aux fins d'une action pertinente à toutes les échelles où l'Anthroposphère manifeste ses effets perturbateurs.

Il aura fallu pour ce faire attendre l'année 2010.

### 1.1.6 CBD, Biodiversité et Développement Sostenable

Les chefs d'états et de gouvernements présents au Sommet mondial des Nations Unies de 2002 à Johannesburg, en Afrique du Sud, avaient approuvé son « *objectif 2010* », lors de la Conférence des Parties consacrée à la Convention pour la Diversité Biologique.

Ce plan stratégique avait pour mission « *d'assurer d'ici 2010 une forte réduction du rythme actuel de perte de diversité biologique aux niveaux mondial, national et régional, afin de contribuer à la réduction de la pauvreté dans le monde, et au profit de toutes les formes de vie sur terre* ».

Lors du Sommet mondial de 2005, les Parties représentées s'engagèrent de nouveau à atteindre l'objectif fixé pour 2010. Lors de cette session furent notamment présentées les conclusions concernant l'étude de l'Ee et de son inaptitude à rendre compte de la biodiversité, et de sa consommation anthropogénique (CBD, 2005).

En 2010, la Conférence des Parties réunie à Nagoya (Japon) faisait le point des progrès accomplis, et force fut de constater que l'objectif 2010 n'était pas atteint. Elle adopta alors un nouveau plan stratégique, le « *Plan stratégique pour la Biodiversité 2011-2020* », qui inclut une vision partagée, une mission, 5 enjeux stratégiques et 20 objectifs stratégiques, ensemble connus comme *Les Objectifs d'Aichi (The Aichi Targets)*. <https://www.cbd.int/sp/targets/>

L'objectif n°2, visait notamment *l'intégration des valeurs de la diversité biologique dans les stratégies et les processus de planification nationaux et locaux de développement et leur incorporation dans les comptes nationaux*, ce en quoi il convergerait désormais avec les objectifs des Nations Unies concernant le *Système de Comptabilité Economique et Environnementale* ou SCEE (*System of Environmental-Economic Accounting - SEEA*), sur lequel notre directeur de thèse attira tout particulièrement notre attention (UN, 2012).

Mais la réflexion sur les outils et indicateurs du développement sostenible au regard de la biodiversité avait pour autant fortement évoluée.

Ce dont une publication spéciale du Secrétariat de la CBD fit état dans son cahier technique n°54 : *Interdependence of biodiversity and development under global change* (CBD, 2010).

Nous donnerons ici un extrait particulièrement significatif de cette publication, au regard de notre problématique, qui a l'avantage d'exposer le problème et de donner une direction générale à sa résolution :

L'écologie des espaces naturels et l'écologie industrielle procurent toutes deux une gamme de mesures d'approximation de l'efficacité thermodynamique des écosystèmes. En réduisant les caractéristiques et le comportement, souvent confondus, des écosystèmes complexes à des mesures pratiques d'utilisation de l'énergie, il est possible de construire un cadre de travail robuste pour le développement sostenible.

La modélisation thermodynamique et les mesures de performance des écosystèmes procureraient la nécessaire ligne de conduite guidant les politiques de développement social et économique vers une approche système globale.

Par ailleurs, elle éviterait les conflits potentiels entre les divers programmes globaux, par exemple, le Programme de la Convention sur le Changement Climatique (UNFCCC), et la Convention sur la Diversité Biologique (CBD). A ce jour, il y a eu peu d'efforts pour aligner les objectifs de gestion du carbone et la soutenabilité écologique. (e.g. Muys *et al.* 2003).

Le prochain stade du processus de développement d'un cadre unifié pour la soutenabilité est de lier les attributs structuraux et fonctionnels de la biodiversité aux mesures thermodynamiques de la perturbation anthropogénique. Jusqu'ici, les scientifiques ont apporté un cadre théorique pour la thermodynamique des écosystèmes (Holling, 1986; Jørgensen, 1992; Schneider & Kay, 1994; Kay & al., 1999; Kay, 2000). Les tentatives réalisées pour adjoindre des indicateurs mesurables d'efficacité

en *exergie* des écosystèmes à cette théorie, nous ont menés au plus près d'une définition de la capacité et des limites des écosystèmes globaux (Jørgensen 2006).

Cependant, il y a encore des lacunes dans le modèle qui échouent à rendre un juste compte des échelles spatiales et temporelles de la biodiversité. Les héritages historiques et environnementaux de la biodiversité, telle que configurée à travers les espaces naturels, nous fournissent la connectivité, et contribuent à des propriétés émergentes qui sont difficiles à catégoriser en utilisant les principes de la thermodynamique.

Qui plus est, l'utilisation des terres a changé et continue à changer ces fonctionnements naturels, conduisant souvent à la dégradation de la biodiversité et au dysfonctionnement de l'écosystème. Il est nécessaire d'élaborer un cadre conceptuel et un ensemble pratique des mesures de ces aspects de la biodiversité. La théorie des écosystèmes contribue significativement à capturer la valeur de la biodiversité (Jørgensen 2007).

Un concept unificateur de la durabilité combinerait les principes de la théorie des écosystèmes et de la biodiversité structurale (...) Essentiellement, cela appelle en faveur d'une *Approche Ecosystème Radicale* qui combinerait les principes de la théorie des écosystèmes et la thermodynamique de non-équilibre [CBD, 2010:186].

Vue la très forte convergence de cette analyse avec nos objectifs de recherche<sup>50</sup>, nous reprendrons souvent cette citation, au long de notre recherche, comme l'un des termes de référence principaux donnant le cadre problématique et la perspective générale des solutions que nous serons amenés à proposer ; ceci en même temps que nous cadrerons nos objectifs finaux sur l'objectif d'Aichi n°2 de la CBD, commun avec celui des Nations Unies concernant le SCEE.

### 1.1.7 Les prémisses d'un Bilan écologique

#### 1.1.7.1 Le concept de *Bilan* appliqué à l'environnement

On ne discute plus aujourd'hui de la nécessité de mesurer les flux financiers parcourant nos économies. La standardisation des systèmes de comptabilité (Plan comptable, ...) et d'analyse financière s'est partout imposée en économie décentralisée depuis la fin de la seconde guerre mondiale. Et avec elle la notion de *Bilan*, qui compare en fin d'année les *stocks* d'Actif et de Passif d'une personne morale, après dégageant du solde annuel de ses *flux* d'entrées et sorties dans son *Compte d'exploitation*.

Depuis les premiers constats sur les limites de la croissance et les grandes conférences de l'ONU sur le développement, puis la mise en exergue des causes économiques du changement climatique, ..., cette notion de bilan s'est de même progressivement imposée dans les cadres statistiques internationaux, pour les politiques énergétiques tout d'abord (ONU, 1983) et plus tard environnementales (ONU, 2003).

Il s'agissait désormais d'opposer les activités économiques à leurs impacts environnementaux, dans l'optique d'une identification de plus en plus précise des causes ayant engendré tels effets constatés. Et ceci afin de pouvoir évaluer et engager, selon le champ d'intervention de la personne morale impliquée, telles actions correctrices à court terme, tel aménagement à moyen terme, telle planification à long terme d'un développement alternatif.

---

<sup>50</sup> Nous avons débuté notre doctorat l'année même où ce document du Secrétariat de la Convention pour la Diversité Biologique fut publié, sans en avoir aucunement été informé préalablement.

C'est selon une telle démarche que nous procédions, alors que nous étions encore impliqués dans les politiques environnementales de la Région Paca, aux fins de clarifier et définir les champs d'intervention, de programmer et évaluer les actions régionales en vue du *développement durable* et/ou de l'*écodéveloppement* de ses territoires.

Ce qui aura facilité notre décision d'engager une recherche doctorale, jusqu'au constat de carence de l'Ee dont nous avons rendu compte.

### 1.1.7.2 Un bilan *écologique* de l'économie industrielle ?

Il s'agissait pour nous dorénavant, en plein accord avec notre directeur de recherche (qui nous avait initialement informé des contradictions internes de l'Ee, et suggéré de les éclaircir), de mettre au point un « nouvel » outil répondant à plusieurs exigences croisées.

- Celles de l'interrogation centrale isolée en introduction, soit une mesure commune à l'environnement et à l'économie susceptible de nous indiquer, avec le plus de précision possible, les différents impacts de l'économie (de la *Cité* donc, quelle que soit son échelle) sur *l'intégrité fonctionnelle et la productivité des écosystèmes dépendants* (Rees, 1992), et au delà, nous donner un indice global, en prenant l'exemple d'un thermomètre, de la température critique de la planète qu'il ne saurait être question de dépasser.

- Celles de la CBD, qui suite à ses propos de 2005 : « ... *it would be desirable if existing concepts could focus directly on the impacts of economic activities on biodiversity* », avait défini en 2010 les problématiques et contraintes générales de faisabilité d'un système de mesure qui serait apte à rendre compte de, et/ou mesurer, la diversité biologique des territoires naturels comme *nouvelle nature de la Nature* (cf. paragraphe 1.1.6).

- Celles du *Système de Comptes Intégrés de l'Environnement et de l'Economie* (SEEA), publié par le service statistique de l'ONU (2003), qui a repris à son compte les grands objectifs de l'Economie écologique visant à établir des standards d'intégration environnement-économie susceptibles de guider les dirigeants politiques sur les voies de la soutenabilité.

Toutes exigences qui ensemble revenaient à établir un bilan des relations homme-nature, aussi interprétable comme un bilan *écologique de l'économie industrielle* (de la révolution industrielle ?), *de la perturbation anthropogénique de la biodiversité, ...*, susceptible de caractériser et signifier leurs impacts cumulés sur *l'état global de la planète* (diagnostic de santé, tous types d'espaces pris en compte), d'établir les relations de cause à effet, et de nous ouvrir les voies d'un développement alternatif véritablement *écologique*.

### 1.1.7.3 Assise conceptuelle et cadre opérationnel du *Bilan écologique*

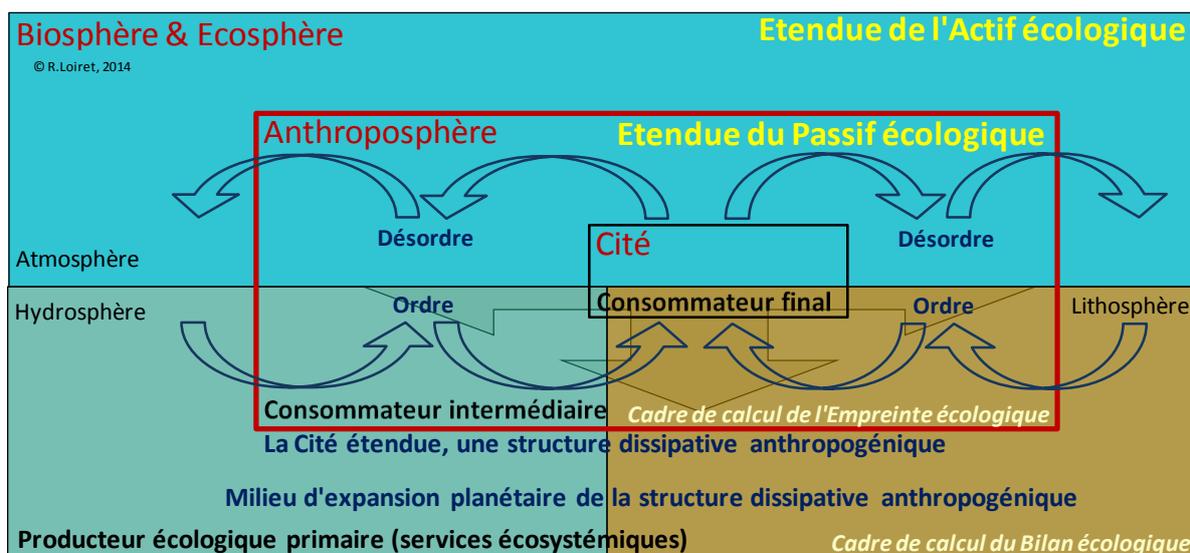
Mais qu'est-ce qui caractérise un tel bilan ?

Et comment, structurellement, le différentier de l'Ee ?

Nous avons, depuis le début de notre thèse, *caractérisé* en plusieurs phases successives (Loiret, 2011b, 2011d, 2012b), le concept sémantique de « *Bilan écologique* », composé d'un actif et d'un passif *écologiques*.

Nous le positionnerons maintenant de manière fonctionnelle, en reprenant les opérateurs sémantiques de la figure 1, et en présentant cette fois une assise conceptuelle et un cadre opérationnel de calcul du *Bilan écologique* clairement distincts de ceux de l'Ee.

L'objectif du *Bilan écologique*, qui le rend strictement autonome vis à vis d'elle, vise ainsi à rendre compte explicitement de cette nouvelle *nature de la Nature* ignorée par l'Ee.

Figure 3 : Cadre opérationnel du Bilan *écologique* des relations Homme-Nature<sup>51</sup>

Ce schéma met en avant, de l'échelle locale à l'échelle planétaire, une *structure dissipative anthropogénique* émergeant de la distinction entre les deux grands opérateurs sémantiques que forment les couples Biosphère-Ecosphère et Anthroposphère-Cité, à priori antagoniques.

Il nous offre une réponse *au premier volet* de l'interrogation centrale que nous formulons en introduction :

*Quels aspects des activités systémiques de la nature et de l'homme caractériseront l'ordre et le désordre thermodynamiques comme opérateurs structurants d'un bilan des relations homme-nature ?*

Il nous permet en effet d'identifier de manière explicite le producteur territorial d'ordre, dont nous rattacherons les stocks et flux de production à la notion d'*Actif écologique*, et le consommateur de cet ordre, lui même producteur de désordre, dont nous rattacherons les stocks et flux de consommation à la notion de *Passif écologique*.

Ce découpage appelle cependant une précision difficilement représentable dans le schéma. L'étendue de l'Actif écologique recouvre en effet tout le cadre, y compris à l'intérieur de l'Anthroposphère. On y trouve en effet divers écosystèmes sous contrôle (agriculture, élevage, sylviculture, ...) qui produisent des actifs de nature biologique, même si ceux-ci sont grevés de diverses consommations issues de l'Anthroposphère, comme les énergies fossiles, les engrais chimiques, les machines, etc. Raison pour laquelle nous les nommerons plus tard des *écosystèmes industriels*.

Ainsi, l'Actif écologique comprendra la totalité des produits de la Biosphère et de l'Ecosphère, y compris sous contrôle, quand le Passif comprendra la totalité des consommations et productions de l'Anthroposphère. Nous obtiendrons ainsi un actif net de toute ponction, s'il y a lieu, par simple différence entre actif et passif.

Ce schéma formera *l'assise sémantique et conceptuelle* du cadre opérationnel d'analyse et de calcul (cadre comptable) du *Bilan écologique*, comparant le passif et l'actif écologiques. Il introduit les questions relatives *au second volet* de notre interrogation centrale, qui fondent notre problématique globale, et qui nous mèneront au vrai challenge de notre thèse.

<sup>51</sup> Comme nous l'avons déjà exprimé, nous expliciterons en détail les grands *opérateurs sémantiques* ici retenus.

## 1.2 Une problématique globale

Nous formulons ainsi le second volet de notre interrogation centrale :

*Quelle unité de compte ou de valeur, commune aux activités de la nature et de l'homme, permettra la mesure thermodynamique comparative de la production d'ordre et de désordre, et autorisera l'établissement d'un bilan révélateur des relations de cause à effet, et significatif des impacts cumulés ?*

Cette section aborde ce volet en étudiant les recherches originales d'évaluation énergétique des services apportés par la nature à l'économie. Ceci aux fins de faire apparaître, d'approfondir et expliciter, en les repositionnant dans leur contexte primitif d'expression, les deux composantes de la problématique globale à laquelle cette interrogation nous confronte.

Elle pose en effet diverses questions relatives à une mesure biophysique du vivant, notamment face au second principe de la thermodynamique. Nous les approfondirons en développant notre état de la question introductif, tel que nous l'avons laissé, après les Physiocrates et la formulation des grandes lois de la thermodynamique, quand Engels (1882) rendait compte à Marx de son analyse critique de l'article de Podolinsky (1880).

Dans la pleine foulée des évolutions scientifiques radicales qui firent suite aux Lumières, et dans les moments mêmes où la nouvelle théorie de nutrition des sols de Liebig était en train de prendre son envol planétaire, Podolinsky formulait en effet, avec sa *théorie de l'accumulation d'énergie*, une contradiction apparente à *la loi des rendements décroissants*, qui marqua la naissance de *l'analyse énergétique*.

Elle fondait une lignée ininterrompue de questionnements qui aboutiront à une remise en cause essentielle de *la flèche du temps*, induite par la théorie de l'évolution rapportée au principe de Clausius.

### 1.2.1 Mini panorama introductif à l'analyse énergétique

Les *Concepts et méthodes d'établissement des statistiques de l'énergie* établis pour le compte de l'ONU nous présentent les objectifs actuels de l'analyse énergétique :

L'analyse énergétique a pour objet d'identifier et quantifier non seulement l'apport direct d'énergie facilement identifiable et mesurable dans un processus ou un produit, mais aussi les apports indirects d'énergie situés en amont, tout au long de la chaîne de production des outils participant du processus de fabrication d'un produit. Ces apports indirects peuvent être déterminés d'une manière toujours plus étendue, en commençant par l'énergie servant à l'extraction, au transport et à la transformation des sources d'énergie utilisées dans un processus donné. Ce champ peut être étendu aux apports d'énergie correspondants, nécessaires pour fournir la matière première et les autres apports non énergétiques entrant dans le processus. En élargissant encore ce champ, on peut y inclure les entrées énergétiques dans les biens d'équipement utilisés dans le processus et dans les industries d'approvisionnement situées en amont ainsi que le contenu énergétique des biens importés et exportés. Ce type d'analyse peut partir soit d'une « reconnaissance » des entrées en amont dans un produit ou dans un processus donné, soit d'une conversion en termes quantitatifs de la valeur monétaire estimée des apports énergétiques directs et indirects dans une vaste gamme de produits ou d'industries, les données de base contenues dans les tableaux entrées/sorties constituant dans ce cas le point de départ [ONU, 1983, p. 4].

Etant mises à part ses applications spécifiques portant sur les processus naturels de production des écosystèmes, surtout développées par Odum (1983, 1986, 1991, 1996, ...), l'analyse énergétique « moderne », notamment développée par Pimentel (1973, 1979, 1980), vise ainsi la traduction en unités énergétiques des différents flux de matière et de

travail traversant les processus économiques et leurs produits, depuis les secteurs primaires et l'agriculture jusqu'aux industries intermédiaires et aux services rendus aux ménages.

Elle se fonde sur le premier principe de la thermodynamique, qu'elle est supposée vérifier, qui énonce que lors de toute réaction dans un système fermé, il y a *conservation de l'énergie*. De celle-ci on déduit la convertibilité de chacune des formes d'énergie dans l'une ou l'autre des autres formes (chaleur, électricité, travail mécanique,...), qui permet de suivre toutes les phases de transformation des processus matériels, et d'établir les égalités entre les entrées et les sorties énergétiques des processus.

Des bilans homogènes peuvent être ainsi établis, utilisant les différentes unités de compte du Système International (SI) de mesure de l'énergie (Kcal, joules, ...) pour rapporter en unités communes et agréger les transformations matérielles de l'économie, à partir des contenus énergétiques, connaissables ou estimables, des masses de matière transformées (masse x ratio en Kcal/kg ou joules/kg) et de l'énergie nécessaire à leur transformation (travail, puissance calorifique, en Kcal/h, joules/s, ...).

L'analyse énergétique devient ainsi compatible avec *l'analyse entrées/sorties (Input/Output Analysis)* selon Leontief (1973), fondée sur *l'égalité matricielle* (tableaux symétriques) des entrées et sorties d'un processus de production, où tous les produits sortant des industries intermédiaires seront consommés comme entrées de ces mêmes industries.

De cette manière, est enfin autorisé la prise en compte des flux directs et indirects d'énergie (embodied energy) parcourant les transformations économiques et leurs produits, et le développement de méthodologies d'analyse de plus en plus élaborées s'appliquant à des processus économiques de plus en plus variés (économies monétaires et vivrières), larges (du micro au macro économique) ou détaillés (Valette, 1980 ; Deflandre et autres, 1987 ; Matarasso, 1990, ONU, SEEA, 2003).

Ceci étant, depuis sa première formulation en 1880 jusqu'à sa nouvelle mise en œuvre un siècle plus tard, l'analyse énergétique a toujours montré dans ses méthodes et outils, des limites récurrentes qui auront très fortement questionné nombre de chercheurs éminents travaillant sur les relations homme-nature.

Pour l'époque moderne, les travaux de recherche et la thèse de Steven Schilizzi (1982, 1983, 1987), un des promoteurs en France de l'analyse énergétique appliquée à l'agriculture, ont fait apparaître ces limites peut être plus significativement que d'autres, car ils furent exécutés sous la houlette et la direction d'Ignacy Sachs, alors Directeur d'étude à l'EHESS, et mondialement connu pour ses travaux et initiatives sur l'Écodéveloppement (Sachs, 1979, 2007).

Nous tenterons tout d'abord de dessiner ces limites après que Schilizzi (1983) ait posé les premières bases du problème :

Trop souvent, dans la littérature, l'on voit des auteurs établir des bilans énergétiques de systèmes de cultures ou de systèmes de production sans que l'on sache toujours de quel bilan énergétique il s'agit. Il semble, à lire de tels travaux, qu'il suffit de compter les calories à l' "entrée" et à la "sortie" du système pour qu'on puisse ensuite aussitôt passer à l'établissement de "ratios" et à l'étude d'efficacités énergétiques plus ou moins bien définies. Or l'expression de "bilan énergétique", au mieux manque singulièrement de précision, au pire n'existe tout simplement pas [...] Les physiciens - plus exactement les thermodynamiciens - ont clairement montré qu'il fallait, au moins, distinguer entre "bilans enthalpiques" et "bilans exergetiques".

Le bilan **enthalpique** fait application du premier principe de la thermodynamique (conservation de l'énergie) et ne tient pas compte des diverses formes de dégradation de l'énergie. De tels bilans sont appropriés à des systèmes de production de chaleur où l'on voudrait connaître par exemple les pertes de chaleur subies. Un four à combustion de bois pour la cuisson des aliments se prête à un tel bilan. La "valeur énergétique" qu'une plante verte aura acquise par photosynthèse sera aussi sa valeur enthalpique, telle qu'elle peut être mesurée à la bombe calorimétrique. Et c'est encore la valeur enthalpique des aliments qu'il faut prendre en compte lorsqu'on étudie l'énergie métabolisable par un animal.

Le bilan **exergétique** en revanche applique le deuxième principe de la thermodynamique et tient compte des dégradations de l'énergie (mesurables par des bilans entropiques). Il correspond au fait que certaines formes d'énergie ne sont pas transformables en d'autres formes sans une perte d'énergie minimale que donne le coefficient de Carnot. C'est donc un principe d'irréversibilité. De tels bilans sont appropriés chaque fois que l'on s'intéresse à la production d'énergies « nobles », en particulier l'énergie mécanique ou l'électricité. C'est par exemple le cas d'une éolienne dont le travail est le pompage de l'eau dans un puits [Schilizzi, 1983].

Le bilan enthalpique est fondé sur la notion d'*Energie libre de Gibbs*, dite aussi *enthalpie libre*, selon laquelle l'enthalpie (symbole  $H$ ) représente l'énergie totale d'un système dans son environnement, avec  $U$  comme symbole de son contenu énergétique interne, et  $pV$  comme symbole de l'énergie du monde extérieur à ce système. La formule générale de l'enthalpie donnera alors  $H = U + pV$ .

Mais là où le bilan enthalpique met en œuvre une mesure *quantitative* standardisée (en joules) des processus énergétiques (agricoles et/ou industriels), Schilizzi mettait en avant un bilan basé sur une nouvelle mesure *qualitative* de l'énergie, l'*exergie* (Eriksson & Wall, 1976) supposée mesurer la « néguentropie » des ressources naturelles, et dans le même temps rendre compte de l'usure entropique (via les rendements de transformation de l'énergie) particulièrement symptomatique des processus économiques (Wall, 1977 ; Georgescu-Roegen, 1971, 1979).

L'exergie ainsi, permettrait non seulement un bilan des productions naturelles consommées par l'économie, mais aussi, en autorisant une analyse des systèmes productifs en terme de travail physique, permettrait un bilan de leurs transformations au long des processus économiques ; ce qui finalement autorisait a priori un rapprochement entre une théorie de la production énergétique et une théorie de formation de la valeur économique. Ce fut plus tard l'objet de la thèse de Schilizzi :

Il s'agissait d'étudier les « frontières » de l'économie au contact du monde physique et biologique, et l'on a montré en quoi la seconde loi de la thermodynamique y tenait une place centrale<sup>52</sup> [...] Mais l'hypothèse fondamentale de ce travail était aussi qu'il existe des lois « économiques » qui ne font pas au départ intervenir un système de prix, et qui contribuent au contraire à le former : telle l'existence d'**une borne supérieure à la productivité des facteurs physiques** ; telle aussi la relation étroite existant entre rendements thermodynamiques et prix des énergies [Schilizzi, 1987:416].

Thèse qui aura conclu sur les limites de l'exercice :

Il nous manque une théorie cohérente de la production de valeur-ajoutée. Une telle théorie devrait faire intervenir simultanément les concepts de travail physique, que nous avons développé au cours de cette étude, et de travail informationnel, encore rebelle à l'analyse [...] Dans le processus de production d'un produit, les matières premières peuvent être considérées comme contenant peu

---

<sup>52</sup> Nous verrons plus loin comment Engels et Marx signifiaient explicitement une telle frontière, selon eux infranchissable, entre les valeurs d'usage de la nature, et les valeurs d'échanges du système de prix.

d'information (ou une entropie élevée), alors que le produit est « informé ». Cependant ces mêmes matières premières, vues comme des ressources naturelles devant être dégradées avant de finir leur vie à l'état de déchets, apparaissent comme étant « naturellement » structurées et riche en néguentropie (...) relativement aux déchets « déstructurés » rejetés dans l'environnement. Manifestement, l'emploi du concept d'entropie dans son sens informationnel pose problème et s'avère peut-être inadéquat ou appliqué trop superficiellement. Ou alors il faut supposer que le produit consommé et rejeté dans l'environnement « charrie » avec lui plus d'entropie que n'avait été prélevée de néguentropie à titre de ressources naturelles, la production nette d'entropie pouvant venir du maintien et du renouvellement des structures productives [Ibid.].

Schilizzi vérifiait tout d'abord avec sa thèse combien l'analyse énergétique a toujours été tentée depuis son origine, à la suite de la *Physiocratie*, d'élargir sa réflexion à la formulation d'une *théorie biophysique de formation de la valeur économique*.

Mais il vérifiait aussi, malgré l'introduction de la notion d'exergie<sup>53</sup>, combien les ambitions de l'analyse énergétique se seront heurtées au long du siècle la séparant de sa première manifestation (1880), à des contraintes qui auront progressivement mis en avant une barrière théorique radicale : l'inexistence d'une théorie de la valeur ajoutée expliquant à partir de la formation des valeurs d'usage du monde de la nature, leur transformation économique en valeurs échangeables sur le marché.

Barrière à laquelle les travaux de H.T. Odum, qui lui aussi a voulu formuler une théorie biophysique de formation de la valeur économique, en développant pour sa part un concept énergétique, l'*émergie*, aux ambitions parallèles à l'exergie, se seraient de la même manière passablement heurté (Odum, 1983, 1986, 1991, 1996, 2000).

Cette barrière engendra au long des décennies qui suivirent l'émergence de l'analyse énergétique, des questions et hypothèses toujours nouvelles quant aux relations homme-nature, autour desquelles des générations de chercheurs éminents, en chimie, en géologie, en analyse énergétique, en thermodynamique, en biologie évolutionnaire, en écologie, en biogéochimie, en écologie économique, ..., ne cesseront de débattre.

Toutes questions, hypothèses et critiques, en boucles rétroactives, qui auront eu le grand avantage de faire toujours plus clairement apparaître les limites d'un rapprochement théorique entre nature et économie.

Et limites qui remontent directement à la source de notre problématique !

Ce qui nous renvoie aux origines de l'analyse énergétique, à cette époque où, ses différents questionnements n'ayant pas encore formé des disciplines trop spécialisées, ils nous permettront de nous appuyer sur eux pour contextualiser et positionner, dans une cohérence globale, les composantes principales et grandes lignes de force de notre problématique.

### 1.2.2 Le « Podolinsky Business »<sup>54</sup>

Pour Joan Martínez-Alier (2003), c'est Serguei Podolinsky (1850-1891) qui, dans son article *Le Socialisme et l'unité des forces physique*, publié à Montpellier dans *La revue socialiste*, n°8 du 20 juin 1880 (Podolinsky, 1880), a formulé la première expression de l'*analyse*

<sup>53</sup> Nous verrons combien cette notion, qui évolue sans cesse depuis sa première expression (Eriksson & Wall, 1976), est aujourd'hui la plus prometteuse des propositions visant à rendre compte de la biodiversité. Mais avec elle aussi des limites spécifiques qui nous mèneront au cœur de notre questionnement et de nos démonstrations.

<sup>54</sup> Terme introductif de l'analyse d'Engels des travaux de Podolinsky (Engels, 1882).

*énergétique* ; et ceci cent ans avant qu'un Pimentel (1973, 1979,1980), cofondateur, avec Martínez-Alier, Costanza et d'autres de l'*Economie écologique*, en développe des principes plus élaborés.

Podolinsky était un physicien socialiste ukrainien, docteur en médecine, très engagé en politique, en exil à Montpellier (France) à l'époque où il publia son article. Il avait rencontré Marx et Engels à Londres en 1876, et avait envoyé en 1880 à Marx une première version de son article, en français, sous le titre primitif : *Le Travail Humain et la Conservation de l'Energie* (Bellamy Foster & Burkett, 2004).

Ce n'était pas un Marxiste acharné, mais il voyait cependant son travail sur l'énergétique agricole comme une contribution essentielle à la théorie marxiste. Comme il l'écrivit à Marx le 30 mars 1880 dans la lettre d'accompagnement de son article :

J'attends avec une particulière impatience votre opinion sur ma tentative de mettre en harmonie le surplus du travail et les théories physiques [Martínez-Alier, 2003].

Sauf accusé de réception et remerciements, Marx ne répondra pas à Podolinsky, mais aurait confié à Engels le soin de le faire à sa place (Martínez-Alier, 2003). Ce qu'il fera dans une longue analyse critique de son article (Engels, 1882), que nous étudierons après l'avoir présenté.

Cet article, de douze pages, en français, est divisible en deux grandes parties :

### 1.2.2.1 A - La Théorie de l'accumulation d'énergie

Podolinsky développe dans la première partie de son article certains exemples démontrant la capacité des forces de travail humaines (et des animaux domestiques) à intervenir positivement sur la nature pour en augmenter la productivité.

Nommant sa démonstration : *Théorie de l'Accumulation d'Energie*, il la commente ainsi :

... la quantité de force solaire convertie en affinité chimique libre et en mouvement mécanique disponible ou effectif, n'est pas toujours la même et peut être modifiée, entre autres causes, par les efforts des hommes. *Car l'homme, par certains actes de la volonté, peut augmenter la quantité d'énergie solaire accumulée sur la terre et diminuer la quantité dispersée [...]* Voici quelques exemples tirés de la statistique agricole de la France qui tendent à prouver la vérité de nos assertions au sujet de l'influence décisive du travail des hommes ou des animaux dirigés par l'homme sur la quantité d'énergie solaire accumulée par une surface donnée de terrain [Podolinsky, 1880, p. 4/12].

Puis il la développe en forme d'une analyse des *flux énergétiques* entrant et sortant de la forêt et de l'agriculture (française), que nous avons résumée ainsi en suivant l'exemple de Martínez-Alier (2003) :

Tableau 1 (figure 4) : *Analyse énergétique de la production agro-forestière française, selon Podolinsky (1880)*

Calculs de Podolinsky sur la productivité énergétique du travail animal et humain en agriculture					
Moyennes 1870 selon les Statistique agricoles de la France	Production massique (kg/ha)	Production énergétique (Kcal/ha)	(1) Excédent énergétique sur prairie naturelle (kcal/ha)	(2) Dépense énergétique (kcal/ha)	(1)/(2) Productivité en kcal excédent /kcal dépensée
Forêt	900 (bois sec)	2.295.000	--	--	
Prairie naturelle	2500 (foin)	6.375.000	--	--	
Prairie artificielle (a)	3100 (foin, hors semence)	7.905.000	1.530.000	37.450	40,85
Culture de Blé (b)	800 (blé) + 2000 (paille)	8.100.000	1.725.000	77.500	22,26
Valeur énergétique du bois, du foin et de la paille : 2.550 kcal/kg, du blé : 3.750 kcal/kg					
Heures de travail /ha : (a) cheval de labour 50, homme 80 (b) cheval de labour 100, homme 200					
Heures de travail convertie en énergie : 645 Kcal/h (cheval de labour), 65 Kcal/h (travail humain)					

Source : Podolinsky (1880)

Ce tableau nous offre un témoignage unique de la *productivité énergétique* de l'agriculture française en 1870, avant que les pratiques de fertilisation chimique ne soient largement répandues.

Martínez-Alier (2003) nous fait remarquer que Podolinsky ignore dans ses calculs l'énergie des intrants organiques nécessaires à l'entretien de la fertilité, mais ce serait mal prendre en compte la spécificité de l'agriculture française au XIXe siècle, alors très majoritairement fondée sur la *polyculture-élevage* et le *fumier d'étable*. Dans ce cadre, les deux tonnes de paille *séchée à l'air* récoltées pour chaque hectare de blé en sus des 800 kg de grain (cf. tableau 1), pouvaient fournir après mise en tas du fumier en sortie d'étable, aux alentours de dix tonnes de fumier décomposé moyennement humide, suffisantes à « boucler » le cycle de fertilité d'un hectare de terre à blé (Soltner, 1979). Or la production du fumier ne demandait alors que du travail animal et humain, déjà inclus dans le tableau.

Ce tableau fait nettement apparaître que le différentiel de productivité énergétique entre une prairie naturelle (où le travail de l'homme et de l'animal qu'il peut guider n'interviennent qu'à la marge), et une prairie artificielle, puis une culture de blé (où ils interviennent de plus en plus), est largement supérieure à la quantité énergétique de travail animal et humain qu'il a fallu incorporer dans le sol pour augmenter cette productivité. Soit 40,85 kcal (kilocalories) de productivité supplémentaire des pâturages par kcal de travail humain et animal dépensée, et 22,26 kcal de productivité pour la culture du blé (pailles comprises).

Et c'est sur ses bases que Podolinsky formulera une *Théorie de l'Accumulation d'Énergie*, qui semble mettre en avant une loi de productivité du travail conjoint de l'homme (et de l'animal) et de la nature, selon laquelle l'homme serait en capacité d'augmenter la quantité d'énergie solaire que la nature stocke d'elle-même sur terre.

Cette théorie venait à priori vérifier l'assertion fondatrice des Physiocrates comme quoi *la terre est la source de toutes richesses*, ainsi que les enseignements que Marx en avait tirés (Marx, 1861-1863), qu'il résumera plus tard dans cette phrase introductive de la *Critique des programmes de Gotha et d'Erfurt* :

Le travail n'est pas la source de toute richesse. La nature est tout autant la source des **valeurs d'usage** (qui sont bien, tout de même, la richesse réelle !) que le travail, qui n'est lui-même que l'expression d'une force naturelle, la force de travail de l'homme [Marx et Engels, 1875].

Cette théorie avait en un mot vocation à vérifier le caractère très particulier d'un travail conjoint homme-nature qui était au cœur de *la reformulation marxiste de la Physiocratie* !

D'où tout l'intérêt que représentera l'analyse d'Engels des travaux de Podolinsky que nous étudierons plus loin.

Revenant à ses calculs, nous avons établi une brève comparaison des résultats de 1870 avec ceux de l'agriculture française un siècle plus tard, en appliquant à 1970 les principes de calcul de la productivité énergétique établis par Podolinsky.

Tableau 2 (figure 5) : Comparaison de la *productivité énergétique* de l'agriculture française entre 1870 et 1970

Comparaison de la productivité énergétique de l'agriculture française entre 1870 et 1970	Année	Rendement Qx/ha	(kcal/ha)					(1)/(3) Productivité énergétique totale (kcal prod. / kcal conso.)	(2)/(3) Productivité énergétique surplus (kcal prod. / kcal conso.)
			Production énergétique			(2) Surplus énergétique vis à vis prairie naturelle	(3) Consommation énergétique		
			Grain	Paille	(1) Total récolte				
Prairie naturelle de référence	1870	25			6.375.000	--	--	--	--
Prairie artificielle traditionnelle	1870	31			7.905.000	1.530.000	37.450	211,08	40,85
Prairie artificielle mécano chimie	1970	50			12.660.000	6.285.000	2.260.000	5,60	2,78
Culture du blé traditionnelle	1870	8	3.000.000	5.100.000	8.100.000	1.725.000	77.500	104,52	22,26
Culture du blé mécano chimie	1970	50	20.000.000	12.750.000	32.750.000	26.375.000	4.000.000	8,19	6,59
Culture du blé mécano biologique	1970	40	16.000.000	10.200.000	26.200.000	19.825.000	1.330.000	19,70	14,91

Sources : Podolinsky (1880), Leach (1973), Bel et autres (1978), CNEEMA (1979) © R.Loiret 2014

Quoique les données de 1970 ne soient que *relativement* comparables<sup>55</sup> à celles de 1870, les contrastes de productivité établis dans ce nouveau tableau sont si importants qu'ils peuvent dans tous les cas nous servir de référence.

Il met bien en relief les augmentations de rendement massique des différentes cultures, mais fait apparaître dans le même temps une chute *phénoménale* de productivité énergétique, ceci tout particulièrement du fait de l'intensification de la mécanisation et de l'usage des énergies fossiles en agriculture depuis la fin de la seconde guerre mondiale.

Et s'il venait à notre lecteur de douter des très faibles rendements énergétiques de l'agriculture chimique, voici en complément une petite étude de rendement énergétique (basée sur les mêmes principes de calcul) d'un échantillon de 12 exploitations agricoles de Bourgogne (Risoud et Chopinet, 2009). Tout en vérifiant que nos chiffres de 1970 sont tout à fait réalistes, elle ferait bien apparaître *une loi de productivité énergétique décroissante*.

Tableau 3 (figure 6) : Productivité énergétique de 12 exploitations bourguignonnes, 1999

Productivité énergétique de 12 exploitations agricoles de Bourgogne	
Type d'exploitation	Productivité énergétique totale
Culture céréalière standard (mécano chimie)	8,8
Culture céréalière intensive (mécano chimie)	5,9
Culture céréalière + production de lait	4,7
Polyculture élevage (bovins)	4,2
Polyculture élevage (porcs)	1,6
Elevage bovins	0,8
Production de lait de vache	0,6
Production d'œufs	0,4
Elevage lapins	0,3
Production de lait de chèvre	0,1

Source : Risoud et Chopinet, 1999

Ce qui rejoint et appuie les différents constats des fondateurs de l'analyse énergétique moderne, résumés par Joan Martínez-Alier :

... du point de vue économique, la productivité agricole a augmenté, alors que l'efficacité énergétique de l'agriculture a chuté, comme David Pimentel et d'autres chercheurs l'ont montré (Pellegrini, 2012).

<sup>55</sup> Il est difficile d'obtenir des valeurs précisément comparables à un siècle de distance, quand les techniques et conditions climatiques ont radicalement changé. Raison pour laquelle ce tableau ne doit être entendu que comme une bonne approximation, indicative d'une « tendance » qu'il serait très « utile » de vérifier en profondeur.

Ce constat étant relativisé pour la productivité énergétique de la culture *biologique* du blé, qui montre dans le tableau 2 une augmentation relative vis à vis de l'agriculture *chimique* ; sachant que la différence par rapport à l'agriculture *traditionnelle* réside malgré tout dans sa mécanisation et dans l'importation de fertilisants organo-biologiques anciennement produits sur place.

Cette analyse comparée caractérise ainsi dans leurs grandes lignes les différences essentielles entre agriculture *traditionnelle*, agriculture *mécano-chimique* et agriculture *mécano-biologique*.

Ceci souligne toute l'importance du concept de *productivité énergétique* de l'agriculture en regard de la seule productivité massique, dans la situation mondiale actuelle, tant sociale qu'environnementale.

Un concept qui fait bien défaut au système de mesure de l'Empreinte écologique fondé sur le référentiel GAEZ (cf. paragraphe 1.1.3.3.).

### 1.2.2.2 B - L'homme, *machine parfaite* de la production socialiste

Dans la seconde partie de son article, Podolinsky interprète l'utilité de sa découverte dans une longue digression où il définit tout d'abord le travail « utile » comme :

Toute dépense de travail musculaire de l'homme ou des animaux qui a pour résultat une augmentation de la force solaire, accumulée sur la terre [Podolinsky, 1880, p. 6/12].

Puis il développe à partir de cette définition une métaphore *mécaniciste* rapportant le travail des animaux domestiques, et de l'homme qui les guide, à celui d'une *machine parfaite* qui, à la différence des machines *inanimées, imparfaites*, répondrait aux conditions de réversibilité du cycle thermodynamique exprimées par Sadi-Carnot.

A ce point de vue, l'humanité serait une machine qui non-seulement transformerait la chaleur et les autres forces physiques en travail, mais qui produirait aussi *le cycle réversif complet*, qui convertirait son travail en chaleur et en d'autres forces indispensables pour la satisfaction de ces besoins, qui pour ainsi dire ferait remonter à son foyer la chaleur produite par son travail [Ibid.:9/12].

Suite à quoi, s'interrogeant sur les formes de la reproduction les plus avantageuses pour la satisfaction des besoins de l'humanité, il répond que ce sont :

Celles qui produisent la plus grande accumulation d'énergie sur la terre (Ibid. :10/12).

Puis il regarde les formes sociales de reproduction antérieure qui auraient bien pu répondre à cette définition.

Certes ce n'est pas la culture primitive ... [...] Ce n'est pas non plus la production esclavagiste ... [...] Le servage contient déjà quelques éléments de progrès [...] mais comme cet élément de progrès est restreint ! [...] Nous approchons de la production capitaliste [...] Elle atteint des résultats inespérés et elle s'en glorifie. Mais regardons de plus près. Tous ces résultats sont atteints non par le capitalisme, mais par *l'accumulation du travail des générations ouvrières du passé* ou bien *des associations (coopérations) ouvrières du présent*. Le capitalisme au contraire ne fait que jeter, aux époques de crise (engendrées par lui), des milliers d'ouvriers sur le pavé et il agit ainsi d'une façon analogue aux guerres, à l'esclavage, aux maladies épidémiques, c'est à dire qu'il disperse une partie de l'énergie, qui se trouve à la disposition de l'humanité, dans l'espace intrastellaire au lieu d'augmenter son accumulation sur la surface terrestre. [...] Voilà pourquoi nous pensons que *c'est seulement le travail, et justement le travail musculaire, qui doit servir en dernier lieu de base pour la définition de la valeur de la production et c'est lui qui par conséquent entrera comme un élément prépondérant dans toute théorie socialiste d'une juste (ou, ce qui est équivalent, d'une exacte) distribution des produits*. Cette déduction est un arrêt de mort pour tout autre système de production que le système socialiste. Il nous reste seulement à démontrer que le socialisme est justement le mode de production capable d'effectuer la plus grande accumulation d'énergie solaire sur la terre ... [Ibid.:10-11/12].

Il développe finalement, en se basant sur quelques exemples très courts, une ébauche des relations existant entre sa *Théorie de l'Accumulation d'Énergie* et les différentes formes de la production *socialiste* susceptibles d'y répondre, espérant pouvoir y revenir dans un travail plus étendu et circonstancié.

Ce qu'il ne pourra faire car, tombant gravement malade en 1881, il ne recouvrera jamais la santé avant son décès, 10 ans plus tard, à Kiev.

### 1.2.3 La critique d'Engels

Le compte rendu critique des travaux de Podolinsky réalisé par Engels (1882) à l'attention de Marx, constitue à notre connaissance le seul exemple de critique d'une approche énergétique (biophysique) de la *valeur* réalisée par un des pères fondateurs du *Matérialisme historique*.

Ses arguments acquièrent ainsi une valeur certaine en regard des fondamentaux de notre thèse, ceci d'autant que, intervenant alors que la thermodynamique prenait son envol, ils en reflétaient les préoccupations les plus vives.

Sa critique à la *première partie* de l'article de Podolinsky (la *Théorie de l'accumulation énergétique*) était très encourageante :

Sa vraie découverte est que le travail humain a le pouvoir de retenir l'énergie solaire sur la surface terrestre et de prolonger son activité au delà de ce qui aurait été le cas sans lui [...] ... *sa très précieuse découverte* [Engels, 1882].

Mais ce ne fut plus le cas de la *seconde partie* de l'article, où Podolinsky déduisait de sa théorie que le socialisme serait le seul mode de production capable de l'appliquer à grande échelle :

Toutes les conclusions économiques qu'il dessine à partir de là sont fausses [...] Il s'est égaré loin de sa très précieuse découverte en confondant les chemins, parce qu'il a essayé de trouver dans les sciences naturelles une nouvelle preuve de la vérité du socialisme, et a ainsi confondu physique et économie [Ibid.].

Cette critique d'Engels expliquera le commentaire de Passet (paragraphe 1.1.2.2a), et celui, plus approfondi, de Martínez Alier (1982, 2003) à son propos, qui feront par la suite l'objet d'un débat continu quant aux capacités du marxisme à intégrer les valeurs écologiques (Burkett, 2006 ; Burkett & Bellamy Foster, 2008, 2011 ; Pellegrini, 2012 ; Rodríguez de Austria Giménez de Aragón, 2014).

Pour comprendre ce que voulait dire Engels, poursuivons notre lecture de son courrier (en suivant le déroulé de son écriture) :

La question est : Comment une quantité donnée d'énergie dans une quantité donnée de nourriture peut laisser derrière elle une plus grande quantité d'énergie qu'elle même ? Je résous cette question ainsi. Assumons que la quantité de nourriture journalièrement nécessaire pour une personne représente une quantité d'énergie de 10.000 UC (unités de chaleur). Ces 10.000 UC resteront à jamais égales à 10.000 UC, et en pratique, comme c'est bien connu, perdront dans le cours de leur transformation en autres formes d'énergie, à travers la friction, etc., une part de leur validité. Dans le corps humain c'est particulièrement considérable. Le travail *physique* effectué pour le travail *économique* ne peut donc jamais être égal à 10.000 UC, mais est toujours moins [Ibid.].

Engels débutait sa critique en rapportant la démonstration de Podolinsky à la digestion et au travail physique de l'homme, et en leur appliquant le nouveau concept d'*entropie* de la thermodynamique (Clausius, 1865), selon lequel toute phase d'un processus de transformation (métabolique) exige la « disgrégation » d'une certaine quantité d'énergie.

Partant de quoi il abordait ensuite le travail *économique* :

Mais cela ne veut pas dire pour autant que le travail *physique* est du travail *économique*, loin de là. Le travail économique effectué par les 10.000 UC ne consiste en aucune façon en la *reproduction* de ces mêmes 10.000 UC, globalement ou partiellement, en telle ou telle forme. Au contraire, beaucoup de celles-ci sont perdues dans la chaleur et la radiation expansive du corps, etc., et ce qu'il reste d'utile d'elles sont les potentialités fertilisantes des excréments.

Le travail économique qu'un homme effectue par l'utilisation de ces 10.000 UC consiste plutôt en la *fixation* d'une plus grande ou plus petite quantité de nouvelles UC apportées par le soleil, qui seules ont une relation avec le travail des premières 10.000 UC. Et si la nouvelle quantité d'UC fixée par l'application des 10.000 UC de nourriture quotidienne atteint 5.000, 10.000 ou 20.000 ou 1.000.000 UC, cela ne dépend que du degré de développement atteint par les moyens de production [Ibid.].

Le premier problème, c'est qu'Engels comparait la démonstration de Podolinsky aux processus métaboliques humains, quand bien même celle-ci ne concernait *à priori* que la productivité conjointe homme-animal-nature.

Mais le second problème venait de Podolinsky lui-même, qui avait encouragé cette direction prise par la critique d'Engels, par une digression générale autour de sa démonstration élémentaire ; ceci le mena de proche en proche d'une *théorie de l'accumulation énergétique* à une *métaphore sur l'homme comme machine parfaite* (où il refusera cette propriété à la nature), puis à une *généralisation* susceptible de fonder une *nouvelle théorie socialiste de la valeur économique* :

Voilà pourquoi nous pensons que c'est seulement le travail, et justement le travail musculaire, qui doit servir en dernier lieu de base pour la définition de la valeur de la production et c'est lui qui par conséquent entrera comme un élément prépondérant dans toute théorie socialiste d'une juste (ou, ce qui est équivalent, d'une exacte) distribution des produits [Podolinsky, 1880:11/12]

Il établissait ainsi une relation directe entre la valeur biophysique du travail et la valeur économique.

Pour Burkett (2006) l'erreur de Podolinsky fut de confondre les propriétés d'un système *isolé* (qui n'échange que de l'énergie avec l'extérieur), qui avait été l'objet d'étude de Carnot, avec celles de l'économie, comme système *ouvert* échangeant énergie et matière avec l'environnement. Mais ceci n'était pas la préoccupation de l'époque, quand on sait que la thermodynamique ne s'ouvrira aux systèmes ouverts qu'avec la théorie des structures dissipatives de Prigogine (1968), notamment. Il nous semble plutôt que Podolinsky relayait alors les concepts d'une nouvelle discipline, *l'énergétique*, qui émergeait dans les années 1880 autour de G. Helm et W. Ostwald, et qui se donnait pour objectif d'interpréter la totalité des transformations naturelles et des échanges économiques en termes de masse et d'énergie (Deltete, 2012). Nous reviendrons dessus.

Toujours est-il que Podolinsky avait cassé les bonnes impressions premières d'Engels en percutant de plein fouet la théorie marxiste de la valeur, qui isolait le rendement du *travail physique*, notamment dans l'agriculture, interprétable en termes de *valeur d'usage*, de toute relation avec le *travail économique* et la *valeur d'échange* des marchandises.

Comme le souligne Martinez-Alier (2003), Marx avait noté et intégré dans sa théorie la distinction d'Aristote entre l'*oikonomia* (la première économie grecque, qui couvrait la circulation des valeurs d'usage *non monétaires* produites par l'économie humaine, essentiellement rurale, de l'*oikos*) et la *chrématistique* (le développement des prix de marché, l'économie *monétaire* de la *cité*).

Quesnay avait lui-même rendu compte de cette distinction en catégorisant deux modes rigoureusement différents de capitalisation et de circulation des richesses sociales : les *fastes de subsistance* et les *luxes de décoration* (Cartelier, 1991).

Marx et Engels ne faisaient ainsi que reprendre à leur compte une frontière établie depuis des siècles<sup>56</sup> entre valeurs d'usage et valeurs d'échange.

Et Podolinsky avait franchi sans s'en apercevoir cette frontière, qui seule devait fondre la théorie marxiste de la valeur<sup>57</sup> !

Mais Engels aller approfondir sa critique :

Et cela ne peut être représenté arithmétiquement que pour les branches les plus primitives de la production : chasse, pêche, élevage, agriculture.

En chassant ou en pêchant, une nouvelle quantité d'énergie solaire n'est pas pour autant fixée, et seulement ce qui a déjà été fixé est rendu utile. Dans le même temps, il est évident que, partant du principe que le pêcheur ou le chasseur sont normalement nourris, la quantité d'albumine ou de graisse qu'ils récupèrent en pêchant ou chassant est indépendante de la quantité d'aliments qu'ils consomment.

Dans l'élevage, l'énergie est fixée dans le sens où la matière végétale, qui autrement se flétrirait rapidement, pourrirait et se décomposerait, est systématiquement transformée en albumine animale, graisse, peau, os, etc., et donc fixée pour un temps plus long. Ici le calcul est déjà compliqué.

Plus encore dans l'agriculture, où la valeur énergétique des matières auxiliaires, des engrais, etc., entre aussi dans le calcul [Engels, 1882].

Engels avait souligné la difficulté croissante à établir une relation arithmétique entre le travail physique et le travail économique au long des processus toujours plus complexes de la transformation matérielle, et revenait maintenant à l'exemple plus simple des activités primaires de l'homme, en montrant qu'à cet endroit, déjà, il n'existait pas de relation entre le rendement physique du travail et son rendement économique.

Arrivant à l'agriculture, il nous confirme que, tout en ayant « entendue » la découverte de Podolinsky, il ne faisait maintenant plus aucun cas de sa démonstration (synthétisée dans le tableau 1), puisque justement elle établissait un tel calcul. Et déjà là, Podolinsky, qui avait voulu *tout démontrer à la fois*, avait visiblement « raté le coche ».

Mais peut être aussi Engels n'avait-il pas tout compris des attendus de cette démonstration ? Raison pour laquelle il se serait réfugié, avec le soutien de Podolinsky lui-même, dans une analyse de son travail à la seule lumière de la théorie de la valeur !?

Toujours est-il que les difficultés du calcul énergétique selon Engels allaient maintenant croître jusqu'à atteindre une barrière infranchissable par la physique :

Dans l'industrie tout calcul prend fin : dans la plupart des cas, le *travail ajouté* au produit ne peut plus être exprimée en UC. Si, par exemple, c'est encore possible avec une livre de fil parce que sa ténacité et sa capacité de résistance peuvent à la limite, avec beaucoup de bruit et de peine, être réduites à une formule mécanique, cela apparaît déjà comme une pièce tout à fait inutile de pédanterie, et dans le cas d'un morceau de toile écrue, et encore plus dans le cas de tissu blanchi, teint et imprimé, cela devient absurde. La valeur de l'énergie d'un marteau, d'une vis ou d'une aiguille calculée en fonction du coût de production est une quantité impossible. A mon avis, il est absolument impossible d'essayer et d'exprimer les relations économiques en grandeurs physiques [Ibid.].

<sup>56</sup> Lors de la séparation, dans la Grèce démocratique, entre la *Cité* et l'*Oïkos* (Vernant, 1974).

<sup>57</sup> Nous approfondirons plus bas ce problème.

Une barrière de l'impossible que les suivants de Podolinsky ne cesseront de repousser toujours plus loin. Ce sur quoi Engels affinera sa critique :

Ce que Podolinsky a entièrement oublié c'est que l'homme en tant que travailleur n'est pas seulement un fixateur de chaleur solaire *actuelle* mais un encore plus grand gaspilleur de chaleur solaire *passée*. Les stocks d'énergie, du charbon, des minerais, des forêts, etc., nous réussissons à les gaspiller, vous le savez mieux que moi. De ce point de vue, que ce soit la pêche ou la chasse n'apparaissent pas comme la fixation de nouvelle chaleur solaire mais comme l'utilisation jusqu'à la création de déchets de la chaleur solaire déjà accumulée [Ibid.].

Elargissant du *métabolisme animal* au *métabolisme économique* la production d'entropie, Engels anticipait là le travail d'un Georgescu-Roegen (1971, 1979) sur le caractère *entropique* de l'économie. Mais Podolinsky avait montré qu'il connaissait très bien ce phénomène (en précisant qu'il faut dans le texte suivant assimiler la notion de chaleur à celle d'énergie accumulée) :

D'après Sadi-Carnot, il faut, pour pouvoir juger du degré de perfection d'une machine thermique, connaître non-seulement son coefficient économique, mais aussi sa capacité de faire renaître la chaleur dépensée par le travail [...] Or aucune machine construite par les mains des hommes ne possède cette faculté. Aucune machine ne chauffe son foyer uniquement par son propre travail, et chez aucune d'entre elles la marche du cycle réversible, c'est à dire la transformation du travail en chaleur n'est connue [Podolinsky, 1880:9/12].

Cependant, tout à l'« excitation » de sa découverte d'une *machine parfaite*, il fera une nouvelle erreur. Il attribuera à *la seule humanité* (tout le mérite de) la capacité d'accumuler l'énergie à la surface de la terre, en ignorant, à *l'encontre de sa propre démonstration*, que c'est le *monde végétal* qui accomplit dans tous les cas, à l'échelle de la Biosphère et de l'Ecosphère<sup>58</sup>, le travail primitif d'accumulation énergétique, éventuellement assimilable au *cycle réversible* de Carnot.

Le monde végétal, ne produisant presque pas de mouvement mécanique effectif, ne peut aussi être envisagé comme un exemple d'une machine thermique parfaite. Mais en observant le travail de l'humanité, nous voyons devant nous justement ce que Sadi-Carnot aurait appelé *une machine parfaite* [...] A ce point de vue, l'humanité serait une machine qui non-seulement transformerait la chaleur et les autres forces physiques en travail, mais qui produirait aussi *le cycle réversible complet*, qui convertirait son travail en chaleur et en d'autres forces indispensables pour la satisfaction de ces besoins, qui pour ainsi dire ferait remonter à son foyer la chaleur produite par son travail [Ibid.].

Comment donc avait-il pu à ce point « tendre le bâton pour se faire battre » ? En proférant une telle absurdité<sup>59</sup>, déjà contradictoire aux idées physiocratiques, il était entré une nouvelle fois en contradiction frontale avec les préceptes marxistes :

Le travail n'est donc pas l'unique source des **valeurs d'usage** qu'il produit, de la richesse matérielle. Il en est le père, et la terre la mère, comme le dit *William Petty* (Marx, 1867:47).

Ou encore :

Le travail n'est pas la source de toute richesse. La nature est tout autant la source des **valeurs d'usage** (qui sont bien, tout de même, la richesse réelle !) que le travail, qui n'est lui-même que l'expression d'une force naturelle, la force de travail de l'homme [...] Les bourgeois ont

<sup>58</sup> Ce que nous verrons avec Vernadsky, le père de la Biosphère, qui lui-même cita Podolinsky, son compatriote ukrainien, comme un prédécesseur qui chercha à expliquer la vie comme un processus qui utilise l'énergie en ralentissant sa dissipation.

<sup>59</sup> Propre à faire se pâmer de douleur Georgescu-Roegen, qui, après Engels donc, intégra, à priori pour la première fois, le second principe de la thermodynamique dans l'analyse énergétique des processus économiques (Georgescu-Roegen, 1971).

d'excellentes raisons pour attribuer au travail cette surnaturelle puissance de création : car, du fait que le travail est dans la dépendance de la nature, il s'ensuit que l'homme qui ne possède rien d'autre que sa force de travail sera forcément, en tout état de société et de civilisation, l'esclave d'autres hommes qui se seront érigés en détenteurs des conditions objectives du travail [Marx & Engels, 1875].

Il n'en suffisait pas plus pour être considéré comme un bourgeois !

La *machine parfaite* de Podolinsky lui aura ainsi explosé entre les mains, formant le levier qui permettra à Engels d'inverser entièrement le sens de sa démonstration.

Ce en quoi Engels, emporté lui même par la dérive de Podolinsky, dépassera dans la critique de son travail l'appréciation de sa découverte, qui désormais passera au second plan.

Et ce sur quoi il pointera finalement dans sa lettre, sur le travail conjoint de l'homme et de la nature, que Podolinsky avait décidément *oublié*, avant de revenir une dernière fois sur sa confusion :

Plus loin : ce que l'homme fait délibérément par son travail, les plantes le font inconsciemment. Les plantes - et c'est déjà une vieille histoire - sont les grands absorbeurs et dépositaires de chaleur solaire en une forme changée. Par le travail, aussi loin qu'il fixe de la chaleur solaire (ce qui dans l'industrie et partout ailleurs est loin d'être toujours le cas) l'homme réussit à unifier les fonctions naturelles de consommation d'énergie de l'animal avec celles de recueil de l'énergie de la plante.

Podolinsky s'est égaré loin de sa *très précieuse découverte* en confondant les chemins parce qu'il a essayé de trouver dans les sciences naturelles une nouvelle preuve de la vérité du socialisme, et a ainsi confondu physique et économie [Engels, 1882].

Nous avons vu ce qu'il en était de cette confusion.

Faute de quoi Engels aura négligé l'intérêt de la découverte de Podolinsky<sup>60</sup>, que ce dernier n'aura plus l'occasion de pousser plus en détail (maladie et décès prématuré).

Et au final, tout le monde sera perdant !

---

<sup>60</sup> Nous y reviendrons largement pour notre part dans la deuxième partie de notre thèse.

### 1.2.4 L'accumulation énergétique face aux *Lumières*<sup>61</sup>

Il y avait dans la théorie de l'accumulation énergétique un caractère très particulier, une valeur ajoutée spécifique du travail conjoint de l'homme, de l'animal et de la nature, qui avait vocation à constituer le noyau de *la reformulation marxiste de la Physiocratie*, mais que nul depuis ne semble vraiment avoir cherché à clarifier et/ou approfondir.

Engels avait parfaitement souligné l'intérêt de cette découverte :

« Sa vraie découverte est que le travail humain a le pouvoir de retenir l'énergie solaire sur la surface terrestre et de prolonger son activité au delà de ce qui aurait été le cas sans lui [...] ... *sa très précieuse découverte* [Engels, 1882].

Elle promettait un véritable fondement à une potentielle *théorie de formation des valeurs d'usage* vérifiant ces propos tenus en commun avec Marx :

« Le travail n'est pas la source de toute richesse. La nature est tout autant la source des valeurs d'usage (qui sont bien, tout de même, la richesse réelle !) que le travail, qui n'est lui-même que l'expression d'une force naturelle, la force de travail de l'homme [Marx & Engels, 1875].

Mais nous avons vu ce qu'en retiendra finalement Engels, dans la foulée de ce que retiendra Marx de ces valeurs d'usage pour sa théorie de la formation de la valeur (nous le survolerons plus loin).

Il nous semble pourtant que la théorie de l'accumulation énergétique n'avait pas tout dit des propriétés synergiques de la relation homme-nature qu'elle était susceptible de révéler, et qui avaient complètement échappées à Podolinsky.

Ces propriétés, un chercheur de l'INRA, Claude Reboul, les a poussées, en ce qui concerne les « sols agricoles », à un degré d'analyse inégalé. Par ses *Déterminants sociaux de la fertilité des sols*, (Reboul, 1977), il définira le sol fertile comme un « produit social » et la fertilité comme le produit d'un « rapport social », seule source de formation d'un « capital fertilité de production » (Reboul, 1987).

Reboul devrait guider nos pas quand, dans notre conclusion générale, nous aborderons, avec l'*indice d'écodéveloppement*, cette question spécifique d'un travail conjoint homme-nature. La question sera alors de savoir comment élargir le concept de *capital fertilité de production* à la *nouvelle nature de la Nature* !

Pour l'heure, nous recentrerons notre attention sur la seule notion d'accumulation énergétique. Et reviendrons pour ce faire à ce qu'Engels avait rétorqué quant à la machine humaine *parfaite* :

---

<sup>61</sup> Il y a ici un double sens, les nombreuses lumières *physiques* de la cité et les *Lumières scientifiques*. Nous entendons par ces dernières ce processus au caractère *paradigmatique* par lequel, suite aux *Lumières* du XVIIIe siècle, puis aux révolutions françaises et industrielles, le XIXe siècle triomphant a imposés sa démarche et ses grandes découvertes comme une nouvelle vérité scientifique universelle *indissociable* de la nouvelle vérité socio-économique universelle issue des *Lumières*, la démocratie libérale, avec laquelle elle devait bientôt dominer le monde. Simon Schaeffer, dans *La fabrique des sciences modernes*, nous raconte comment : « *La nature à l'aube des Lumières n'est plus un livre à déchiffrer, mais un champ à travailler. Comètes, marées, tremblements de terre, cessent d'être considérés comme les prodiges d'un univers immuable et transcendant. Au XVIIIe et au XIXe siècle, l'avènement du capitalisme industriel et son développement mondial jouent un rôle fondamental dans l'avènement des sciences modernes. La nature devenue chantier peut être explorée, contrôlée et instrumentalisée. Dans les observatoires et laboratoires, cours et académies, théâtres et manufactures, les Newton, Lavoisier, Lord Kelvin, mais aussi des artisans, des médecins, des jésuites, des hommes de spectacles, s'attèlent à une nouvelle forme à la fois de connaissance et de gouvernement de la nature : les sciences expérimentales* ». Dans la déferlante de ce nouveau courant, le second principe de la thermodynamique s'imposera comme le chef d'orchestre dirigeant l'harmonie de cette domination absolue, ce dont la *morgue* des propos d'Eddington (voir plus loin) accompagnant sa *Flèche du temps* est particulièrement significative. Toutes choses dont Edgard Morin a consacré, avec sa *Méthode*, une grande partie de sa vie professionnelle à dénoncer les effets pervers, quels que soient les apports indéniables de ce nouveau regard disjonctif (sujet/objet) posé sur le monde.

Ce que l'homme fait délibérément par son travail, les plantes le font inconsciemment. Les plantes - et c'est déjà une vieille histoire - sont les grands absorbeurs et dépositaires de chaleur solaire en une forme changée. Par le travail, aussi loin qu'il fixe de la chaleur solaire (ce qui dans l'industrie et partout ailleurs est loin d'être toujours le cas) l'homme réussit à unifier les fonctions naturelles de consommation d'énergie de l'animal avec celles de recueil de l'énergie de la plante. Podolinsky s'est égaré loin de sa *très précieuse découverte* en confondant les chemins ... [Engels, 1882].

Il semblait ainsi suggérer que ce seraient bien les plantes plutôt que l'homme qui seraient cette machine parfaite accomplissant cycle idéal de Carnot.

Et que ce n'est qu'à partir de là seulement, l'homme s'appuyant sur elle, que la question d'un homme fixateur de chaleur solaire pourrait peut être se reposer, la chose étant alors loin d'être le cas (sans parler d'aujourd'hui !).

Retenant cette idée, et si nous élargissons une fois encore le cadre de son étude, depuis les seules plantes en rapport avec les sols agricoles, à la nouvelle nature de la Nature, cette question, une fois ramenée au cadre d'analyse du bilan écologique, reviendrait primitivement à vérifier que les écosystèmes naturels, hors Anthroposphère (cf. paragraphe 1.1.4.3 et figure 3), accomplissent le cycle idéal de Carnot, et donc un cycle de travail *réversible*, cumulant l'énergie au long de l'évolution, plutôt que de l'épuiser !

En attendant, Engels se rendait-il compte en formulant ces derniers concepts, que les arguments qu'il avait développés tout au long de sa critique de Podolinsky se retournaient à ce moment contre lui ?

Et qu'une telle théorie de la « réversibilité » entrerait tout aussi bien, et paradoxalement, en conflit avec les positions de Marx, en accord avec les découvertes de Liebig vérifiant la loi des rendements décroissants ?

Expliquons-nous :

Depuis la fin du XVIII<sup>e</sup> siècle, la vague cumulée des *Lumières*, de la révolution française, de la révolution industrielle, de l'objectivation scientifique face à l'Eglise, avait entièrement bouleversé le cadre de référence traditionnel des sciences de la nature.

Darwin avait découvert une évolution des espèces fondée sur le hasard :

Selon Darwin, l'évolution est la somme des divergences résultant des variations accidentelles subies par les individus, et qui produisent des changements lents, perpétuels et à peine perceptibles ; il y a une quantité innombrable de variations héréditaires, et elles vont dans toutes les directions [Jakobson, 1971].

Et le second principe semblait vérifier une relation étroite entre hasard et entropie, dans son caractère accidentel, au point que Sir Arthur Eddington introduira dans ses *Gifford Conferences* de 1927 l'expression « flèche du temps » pour traduire le caractère *irréversiblement entropique* de l'évolution<sup>62</sup> ; en proclamant dans le même temps :

La loi selon laquelle l'entropie augmente toujours - la seconde loi de la thermodynamique - occupe, je crois, la position suprême parmi les lois de la nature. Si l'on découvre que l'une de vos théories est en contradiction avec la seconde loi de la thermodynamique, je ne peux vous offrir aucun support ; il ne vous reste que de vous écrouler sous la plus profonde humiliation [Eddington, cité dans Georgescu-Roegen, 1979].

Nul désormais ne saurait plus émettre une quelconque théorie scientifique qui viendrait la contredire.

---

<sup>62</sup> « C'est l'irréversibilité des événements physiques exprimée par la fonction entropie qui oriente le temps [...] Sans l'entropie, il n'y aurait aucune différence entre le passé et le futur » écrit Von Bertalanffy (1968 :155).

Or il apparaît bien que Marx et Engels, partis s'il en est de cette vague « révolutionnaire », avaient entièrement repris à leur compte la nouvelle loi universelle, qui se devait de pénétrer tout aussi bien le *matérialisme dialectique*, au risque de sa profonde *décrédibilisation*. Ce que nous confirme Martinez-Alier :

Marx et Engels ont suivi avec un délai de quelques années beaucoup des remarquables nouveautés scientifiques et techniques de leur temps. Engels a écrit en 1888 que l'on se souviendrait du XIXe siècle non seulement comme le siècle de la théorie de l'évolution, mais aussi de la théorie de la transformation de l'énergie, le siècle de Darwin, Mayer, Joule et Clausius (lettre à Nikolai Danielson, 15 Oct. 1888) [Martinez-Alier, 2003].

La loi de Clausius, affirmant l'irréversibilité de toute transformation, remontait ainsi le cours du temps historique pour s'appliquer à rebours à tous les anciens concepts issus du romantisme et de la physiocratie, détruisant au passage toute idée de valeur d'usage, comme le XXe siècle le vérifiera à une échelle jamais atteinte dans l'histoire, tant de l'évolution que de l'humanité.

Et ceci tout comme cette même loi, dont Liebig avait rendu compte avec la fertilisation minérale (comme palliatif à l'usure des sols), avait balayé la théorie de la fertilité et de l'humus soluble !

Un balayage total auquel avait participé Marx (sans parler de ses héritiers). Ce dont témoigne cette forme complicité qu'il affichait envers Liebig (Marx, 1867, note 246 du chapitre XV, p.660), que nous confirme Martinez-Alier :

Marx et Engels étaient d'une génération plus jeunes que les chimistes agricoles (Liebig, 1803-1873), Boussingault (1802-1887) qui avaient publiées leurs recherches sur le cycle de nutrition des plantes (phosphore, azote, potasse), influencés par la menace des rendements agricoles décroissants et les grandes quantités d'imports de Guano après 1840, principalement du Pérou, comme une marchandise de base essentielle pour la production agricole [...] Marx trouvait Liebig particulièrement pertinent parce qu'il avait décrit les conditions naturelles de la fertilité et les possibilités de développement des forces productives par l'industrie des fertilisants. C'était utile pour la polémique contre Malthus et pour la théorie de la rente foncière. Foster (2000)<sup>63</sup> a analysé en profondeur la dette de Marx à Liebig ....[Ibid.].

Et ceci d'autant que la nouvelle doctrine de nutrition des plantes s'avérait, elle aussi, très utile au *matérialisme historique*, qui formait alors l'anticorps de la doctrine *vitaliste*<sup>64</sup> et de la religion (Martinez-Alier, 2003).

Là où ils avaient été historiquement mi-chèvre (la reconnaissance des valeurs d'usage), mi-chou (l'existence de valeurs d'échange sans rapport avec les premières), Marx et Engels avaient opté, finalement, sans regarder en arrière, pour une théorie du travail essentiellement fondée sur ces dernières valeurs, et avaient avec elles définitivement opté pour la nouvelle *flèche du temps*.

Approfondissons un moment cette idée (Loiret, 2007:27). Dans *Le Capital*, Marx développait longuement son analyse sur la formation de la valeur des biens économiques. Centrant sa réflexion sur leur valeur d'échange, produite par le travail humain, il avait éliminé de son analyse, tout en reconnaissant cependant son existence, un facteur fondamental de la construction de cette valeur : « l'utilité » (la valeur ajoutée reconnue par l'usage, soit les valeurs d'usage) du travail de la nature et de l'homme. Il avait tout d'abord « évacué » l'utilité spécifique du travail de la nature, d'une manière fort élégante :

<sup>63</sup> Foster, J. B., 2000. *Marx's ecology*. Materialism and nature, Monthly Review Press, New York.

<sup>64</sup> Dont était alors suspectées de dépendre les théories de l'abbé Rozier et de l'humus soluble. Nous approfondirons cette question au second chapitre.

Les qualités naturelles (des marchandises) n'entrent en considération qu'autant qu'elles leur donnent une utilité qui en fait des valeurs d'usage. Mais d'un autre côté il est évident que l'on fait abstraction de la valeur d'usage des marchandises quand on les échange et que tout rapport d'échange est même caractérisé par cette abstraction. Dans l'échange, une valeur d'utilité vaut précisément autant que toute autre, pourvu qu'elle se trouve en proportion convenable. Ou bien, comme le dit le vieux Barbon : « *Une espèce de marchandise est aussi bonne qu'une autre, quand sa valeur d'échange est égale; il n'y a aucune différence, aucune distinction dans les choses chez lesquelles cette valeur est la même.* ». Comme valeurs d'usage, les marchandises sont avant tout de qualité différente ; comme valeurs d'échange, elles ne peuvent être que de différentes quantités.... La valeur d'usage des marchandises une fois mise de côté, il ne leur reste plus qu'une qualité, celle d'être des produits du travail ... [Marx, 1867:42].

Il est étonnant de voir comment il reprenait ici à son compte un vieux principe mercantiliste (*toutes les marchandises sont égales - y compris les esclaves - pourvu qu'elles ramènent une même quantité d'or*), pour bâtir dessus les piliers de sa théorie du capital.

Ceci fait, il avait ensuite « évacué » l'utilité spécifique du travail de l'homme :

Avec les caractères utiles particuliers des produits du travail, disparaissent en même temps, et le caractère utile des travaux qui y sont contenus, et les formes concrètes diverses qui distinguent une espèce de travail d'une autre espèce. Il ne reste donc plus que le caractère commun de ces travaux; ils sont tous ramenés au même travail humain, à une dépense de force humaine de travail sans égard à la forme particulière sous laquelle cette force a été dépensée [Ibid.].

C'est ainsi que, partant du savoir (qui semblait pour lui tellement évident qu'il le disait « enfantin ») selon lequel il n'y a de valeur que « dans » le seul travail, puis inversant la proposition, il ne reconnaissait finalement de valeur à la matière et à l'objet que celle du « travail contenu en eux », évacuant ainsi complètement le problème général de l'utilité :

La valeur d'usage des marchandises une fois mise de côté, il ne leur reste plus qu'une qualité, celle d'être des produits du travail [Ibid.:43].

Et de quel travail ?

Les marchandises n'acquièrent leur valeur que tant qu'elles sont l'expression de la même unité sociale, le travail humain [Ibid.:50].

Exit donc de l'utilité spécifique du travail de la nature et de l'homme ! Les mettant de côté, il va dès lors construire tout son système, remarquable mais bancal, d'explication de la valeur d'échange et de la monnaie.

Système qui sera borné par deux trous noirs, au sud et au nord : l'utilité de la nature et de l'homme. Tout travail ne sera plus mesuré qu'en termes tout à fait basiques. N'ayant aucune valeur « en lui-même », on ne le mesurera qu'à l'aune du produit en résultant, lui même n'étant paradoxalement mesuré qu'en heures passées à le faire.

Les ressources naturelles, les marchandises, ne sauraient ainsi contenir *en elles-mêmes* leur propre valeur<sup>65</sup>. Elles ne l'acquiesceraient que comparées à d'autres, qui ne sont qu'elles mêmes « plus » (+) du travail humain. Ainsi en sera t-il de la toile de coton, qui n'acquiesce de valeur que comparée à l'habit qui lui donnera forme. Ainsi en sera t-il « finalement » du problème de la valeur des ressources naturelles et du travail humain selon Marx.

Ce en quoi Marx et Engels devaient échouer à transposer - mais avaient-ils vraiment cherché à le faire ? - dans la production des valeurs d'échange de la *chrématistique* (l'économie monétaire de marché), les savoir-faire productifs des valeurs d'usage de l'*oikonomia* (l'économie traditionnelle non monétaire) !

---

<sup>65</sup> Et tout au bout, par extension logique, l'homme lui-même.

Au bout de quoi nous pourrions constater le *phénoménal paradoxe* d'un illustre personnage (et de son assistant) s'asseyant complètement sur sa propre théorie de formation primitive du *capital* (Marx, 1867, chapitre XXVI - *Le secret de l'accumulation primitive*), pour justifier sa théorie de formation de la *valeur d'échange*.

N'y aurait-il donc aucune relation entre capital et valeur d'échange ?

Le siècle avait changé d'époque ! Et ainsi, Engels aurait-il maintenant voulu, avec cette proposition dont il n'avait pris garde (des plantes accomplissant un cycle réversible), inverser le nouveau cours du temps, qu'il devrait désormais se confronter, non seulement à Marx, mais aussi à la terrible prédiction d'Arthur Eddington pour *s'écrouler sous la plus profonde humiliation !*

C'est ainsi que la théorie, peut être la plus maladroite, mais aussi la plus prometteuse du siècle, fut entièrement éliminée du débat, tant social que socialiste.

En formulant des arguments qui soulignaient cette immense vague d'irréversibilité de la flèche du temps qui allait inonder le XXe siècle, Engels aura cependant accompli à notre avantage ce « travail » (fallait-il simplement le compter en heures ?) consistant à mettre le doigt sur les limites de l'analyse énergétique telle que l'inventait alors Podolinsky.

C'est d'un tel contexte primitif que nous tirerons maintenant les deux composantes de notre problématique globale, *L'accumulation énergétique face aux Lumières (scientifiques)*.

#### 1.2.4.1 Partie A : Quid de l'accumulation énergétique ?

Le débat Podolinsky / Engels est ainsi tout à fait caractéristique de la façon dont ces Lumières là, et Marx/Engels à leur suite, auront éliminé du débat économique l'utilité spécifique du travail de la nature et de l'homme.

La théorie de Podolinsky (1880), toute maladroite qu'elle était, développait une mesure *biophysique* des activités combinées de la nature et de l'homme, mettant en valeur un principe d'*accumulation énergétique* qui faisait de l'homme, bien avant la nature, une *machine parfaite* accomplissant le cycle réversible (idéal) de Carnot, forme de reproduction la plus avantageuse pour satisfaire les besoins de l'humanité.

Et Engels soulignera combien Podolinsky ne regardait que le côté humain du travail productif, quand bien même cela devenait douteux, au regard notamment du second principe, dans le contexte d'expansion de processus économiques de plus en plus entropiques.

Sur quoi il ramènera l'attention, après les Physiocrates, sur le travail d'accumulation énergétique de la Nature, qui semblait accomplir ce cycle idéal.

Mais ce principe d'accumulation « naturel » apparaissait lui aussi et désormais incompatible avec le principe de Clausius à peine formulé (1865). Engels avait appliqué ce principe à l'homme et à l'économie, et reporté tout le mérite de l'accumulation sur la Nature, mais, tout à ses références historiques et peut-être physiocratiques, il n'avait pas pris la mesure que ce principe, promis à devenir le plus universel de la physique, s'appliquait à rebours sur ses propos.

Ce qui interdisait de fait toute fondation d'une production « néguentropique » dont se nourriraient l'économie et l'homme.

Ainsi les deux versants de la Théorie de Podolinsky, le versant humain et le versant naturel, se trouvaient-ils éliminés d'emblée du débat, par le débat lui-même, du moment même où Engels avait introduit le *grand* principe sans prendre garde à toutes ses conséquences.

Ceci quand bien même Podolinsky, par sa *très précieuse découverte*, avait mis le doigt, presque par mégarde, sur une question, *les propriétés synergique de productivité énergétique* de la

relation homme-nature (cf. tableaux 1 et 2), qui pourrait s'avérer primordiale pour l'avenir de l'humanité.

Il nous semble ainsi que la théorie de l'accumulation énergétique, stoppée nette par la critique d'Engels et la mort de Podolinsky qui suivit peu après, était loin d'avoir tout dit des propriétés potentiellement positives de la relation homme-nature qu'elle avait commencé à révéler, et dont Reboul (1977, 1987), par ses *Déterminants sociaux de la fertilité des sols*, avait souligné tout le potentiel de « fertilité ».

Ceci pour peu que nous puissions étendre, comme il en est du Bilan écologique vis à vis de l'Ee, ce potentiel synergique à la nouvelle nature de la Nature !

Toutes choses qui supposent que nous reprenions la Théorie avortée de Podolinsky sur des bases nouvelles, qui prendraient en compte les arguments d'Engels, ainsi que ce principe qui s'appliqua à rebours sur ses propos.

Les recherches sur le vivant ont-elles vérifié depuis Podolinsky l'existence d'un principe « néguentropique » d'accumulation énergétique, partie d'un cycle réversible, qui, tout en même temps qu'il rendrait compte du principe de Carnot/Clausius, imposerait sa propre pertinence ?

La quête *épistémologique* d'une réponse à cette question formera la première composante de notre problématique globale, et fera l'objet particulier de la première section de notre second chapitre, en même temps qu'elle raisonnera sur toute son étendue.

#### **1.2.4.2 Partie B : Mesurer l'énergie biogéochimique du vivant**

Comme nous le verrons dans première section de notre second chapitre, Wladimir Vernadsky (1924, 1929, 1930) formula, en contradiction « apparente » au principe de Carnot/Clausius, les *deux principes de la biogéochimie*, qui donnent ses fondements à la théorie de l'accumulation énergétique en ce qui concerne la Biosphère et l'Ecosphère.

Fondant une première mesure biophysique du travail de la Nature, le premier principe biogéochimique sera plus tard traduit par un nouveau concept énergétique de corporification de l'énergie libre : l'exergie (Wall, 1977 ; Szargut, et autres, 2005).

L'exergie permet aujourd'hui de mesurer *l'énergie géochimique* des matières biogènes accumulées dans les compartiments (atmosphère, hydrosphère, lithosphère) de la Biosphère (Valero Delgado, 2008), et apparaît comme la mesure biophysique la plus prometteuse (CBD, 2010).

Mais elle ne rend pas compte de *l'énergie biogéochimique* des organismes vivants, dont Vernadsky soulignera la différence essentielle avec l'énergie *géochimique*.

Il apparaîtra ainsi que l'exergie, dans sa forme actuelle, ne saurait mesurer et/ou rendre compte de la biodiversité.

Existe-t-il des travaux qui, avant ou après la formulation du concept d'exergie, ont cherché à mesurer une énergie du vivant significative de la biodiversité et de sa consommation anthropogénique ?

Sinon, quelles sont les contraintes et problématiques spécifiques à la mise au point d'une telle unité de mesure ? Et comment les résoudre ?

La quête d'une résolution à cette deuxième composante de notre problématique globale fera l'objet de la dernière section de notre second chapitre et de la totalité du troisième.

**Deuxième partie**  
Recherche épistémologique  
et de nature fondamentale sur  
l'**Actif** *écologique*

## **.Chapitre II.**

### **L'énergie du vivant face aux *Lumières***

*Le chapitre II a pour objectif de répondre à la première composante de notre problématique globale, le principe d'accumulation énergétique, puis d'introduire les deux aspects problématiques relatifs à sa seconde composante.*

*Il étudie et reconstitue dans leurs grandes lignes le contexte historique et la chronologie méconnus des phases épistémologiques au long desquelles la biologie évolutionnaire a formulé, puis la biogéochimie a approfondi, les concepts d'aromorphose et de directionnalité de l'évolution, pour aboutir aux deux principes de la biogéochimie, qui établirent la corrélation absolue entre, d'une part, l'évolution des espèces et de leur biodiversité, d'autre part l'accumulation énergétique de la Biosphère et de l'Ecosphère.*

*Ce qui aura fondé la pertinence d'un quatrième principe de la thermodynamique.*

*Puis il étudie de manière critique les propositions significatives de mesure de l'exergie géochimique du vivant et/ou de la biodiversité, pour aboutir à la formulation des deux aspects de la question relative à la seconde composante de notre problématique globale.*

*Après quoi il établit une grande synthèse posant le cadre général de sa résolution.*

## 2.1 Vers une énergétique de la nature (1914-1945)

Après les Physiocrates, la grande tentation de Podolinsky avait été d'établir une théorie universelle de la valeur à partir de ses constats élémentaires sur l'origine biophysique des plus-values.

Ou disons pour simplifier, d'établir un lien logique et continu entre la formation des richesses naturelles et celle des richesses économiques.

Et cela sera de nouveau et bien souvent le cas près d'un siècle plus tard avec les développements ultérieurs de l'analyse énergétique et de l'économie écologique. Comme Georgescu-Roegen le dira lui même :

Toute l'histoire économique de l'humanité prouve sans contredit que la nature elle aussi joue un rôle important dans le processus économique ainsi que dans la formation de la valeur économique [Georgescu Roegen, 1979:41]

Mais dans l'intermède, si nous n'identifions pas de chercheur de nouveau tenté par la grande synthèse de Podolinsky, cette quête ne sera pas pour autant abandonnée dans ses aspects spécifiques ; comme si la recherche d'une mesure commune à la nature et à l'économie s'inscrivait dans une *directionnalité* de l'intelligence des relations homme-nature, nous assisterons au contraire à un approfondissement des questions pivots que Podolinsky, tout en les soulevant, avait trop rapidement survolées.

Les limites qu'avait formalisées Engels constituaient-elles alors un enjeu partagé par des sciences naturelles confrontées aux nouveaux principes de la thermodynamique ?

Toujours est-il que les questions posées seront reprises poste à poste par certains auteurs qui chercheront coûte que coûte à dépasser les impossibilités ou limites alors apparues, que ce soit de la thermodynamique en regard de la nature et des écosystèmes, ou de l'énergétique en regard de l'économie ; et qui participeront ainsi tous ensemble à réduire quelque peu les morceaux épars de la fracture globale entre *oikonomia* et *chrématistique*, et avec elle de la fracture entre biologie et physique.

Ces recherches se subdivisent très globalement en deux blocs, à l'ouest et à l'est du méridien de Greenwich, qui, tout en approfondissant pour certains, ou en contredisant pour d'autres les bases (darwiniennes) de la biologie évolutionnaire, donneront les siennes à l'écologie globale en opposant des arguments de plus en plus sérieux et fondés aux affirmations de la *flèche du temps*.

Mais ceci dans un contexte particulier qui demande à être introduit.

### 2.1.1 Un contexte de recherche très particulier

Dans les cinquante ans qui suivront l'article de Podolinsky, va émerger un courant de pensée scientifique, longtemps informel, que nous pouvons identifier, en ses débuts, comme la branche *énergétique* de la biologie dite « évolutionnaire », et qui sera pour une très grande part aux origines de l'écologie moderne.

Ce courant ne sera pas centré sur un territoire, une université, un laboratoire, une discipline spécifiques, dans un pays donné, mais va se déployer à la fois à l'ouest, notamment en Amérique, et à l'est, en Russie tout particulièrement.

Les chercheurs qui y adhéreront, généralement des personnalités scientifiques de premier plan, partageaient tous un même attrait pour les sciences de la nature. Pouvant appartenir à des écoles scientifiques particulières, et travailler sur des disciplines et

spécialités non partagées, si ce n'est relativement divergentes, ils se caractérisent en ce qu'ils entreprendront tous d'opposer, implicitement ou explicitement, au second principe de la thermodynamique, alors le grand phare des Lumières, les arguments fondamentaux d'une logique de la nature et de son évolution allant à contresens de la flèche du temps.

Mais il est cependant très difficile d'établir une chronologie cohérente de développement des idées de ce courant.

Ceci provient du fait qu'il existe de fait de grandes barrières culturelles, linguistiques et de communication entre l'est et l'ouest, mais que de plus ces idées furent développées dans le contexte des grands bouleversements qui accompagneront les deux guerres mondiales, accentué par la fracture est-ouest depuis la révolution de 1917 jusqu'à la guerre froide qui a suivi la seconde guerre mondiale.

Par ailleurs, en même temps qu'ils étaient isolés derrière les nombreux murs qui s'érigaient alors, ces chercheurs pouvaient se trouver, de part et d'autre de l'Atlantique, du fait des thématiques qu'ils développaient, à contretemps de l'époque et du mouvement général des publications scientifiques (inscrites dans la *flèche du temps* dirions nous !), en même temps que, pour les russes notamment, suivis par la police politique soviétique.

Et si certains parmi eux partageaient des canaux de communication privilégiés, plus ou moins officieux (nous en avons quelques indices), ceux-ci échappent pour une très grande part à notre analyse, quand les canaux officiels restèrent très troublés jusqu'à la chute de l'URSS.

Ce qui nous donne au final un contexte très particulier, et dont certains auraient profité pour s'approprier idées et concepts qui n'étaient pas de leur fait.

Nous en donnerons d'emblée deux exemples significatifs datant de l'après seconde guerre mondiale.

Premier exemple : En 1946, G.E. Hutchinson, grand contributeur de l'écologie moderne, a présenté lors d'une séance officielle de l'Académie des Sciences de New York son papier intitulé *Circular Causal Systems in Ecology* (Hutchinson, 1946) dans lequel il introduit explicitement une « nouvelle approche » : L'approche *biogéochimique*, et avec elle l'étude des « cercles causaux circulaires » qui, sauf légère différence, ne sont rien d'autre que les *cycles biogéochimiques*, dont le concept est aujourd'hui partagé mondialement.

Nous savons aujourd'hui avec certitude qu'Hutchinson tenait ses concepts de Wladimir Vernadsky, dont nous étudierons les travaux fondamentaux. La preuve en est qu'il communiqua lui même, à l'*Académie des Arts et Sciences du Connecticut*, en 1944, la première traduction anglaise d'une publication de Vernadsky, réalisée par son fils George alors émigré aux Etats Unis (Hutchinson, 1944).

Mais, sauf à citer discrètement cet auteur pour avoir introduit le terme *corpus scientiarum*, il ne le cite « en rien », ni dans le corps de son article, ni dans ses références, pour être le père de la Biosphère, de la biogéochimie, et des cycles du même nom.

Ceci a au moins trois explications : (1) Vernadsky venait de mourir à Moscou en 1945 (2) Son livre séminal, *La biosphère*, publié en Français à Paris en 1929, ne sera traduit en anglais qu'en 1998 (3) Ses publications étaient interdites par Staline depuis 1930 et le resteront jusqu'à la chute de l'URSS.

Et il faudra attendre 1970 (la fin de la guerre froide ?) pour que Hutchinson, en publiant dans *Scientific American* un article qui ne cache pas son nom, *The Biosphere*<sup>66</sup> (Hutchinson, 1970) reconnaisse, enfin, l'influence fondamentale de Vernadsky sur son œuvre.

Ce qui pour autant ne change rien au côté hautain, hégémonique et à vrai dire absurde du système « autoréférentiel » anglo-saxon, en la matière tout du moins. Comme l'écrit fort à propos Levit (2007b) :

Aujourd'hui la majorité des ouvrages d'introduction en Anglais sur la biogéochimie et l'écologie globale ne mentionnent pas Vernadsky (Degens, 1989 ; Schlesinger, 1991, 2004 ; Libes, 1992 ; Fenchel et al, 2000). Les auteurs échappent ainsi à la question sur les origines du concept de biosphère et de la biogéochimie. Comme Schlesinger l'écrit dans son plus récent papier d'enquête : « Je marque le début de la science du changement global avec la publication de 'La Biosphère' comme numéro spécial de *Scientific American* en 1970 » (Schlesinger, 2006). Pour pleinement réaliser l'absurdité de cette situation, on pourrait imaginer un livre sur la biologie évolutionnaire qui commencerait avec la « Synthèse Evolutionnaire » de Ernst Mayr et William Provine (1980) sans aucune référence à Darwin ou avec une petite remarque superficielle à son propos [Levit, 2007b].

Ce qui boucle parfaitement nos propos.

Deuxième exemple, faisant suite immédiate au premier (extrait de Loiret, 2012a :37-49):

Dans ces mêmes années 70, un autre écologiste américain, James Lovelock, publie, tantôt avec, tantôt sans Lynn Margulis<sup>67</sup>, plusieurs articles autour de son « hypothèse Gaïa » (Lovelock et Margulis, 1973 ; Lovelock, 1979), qui feront beaucoup de « bruit » à l'échelle internationale. Mais là aussi sans « aucune » référence à Vernadsky, quand bien même cette hypothèse n'était qu'une extrapolation, qu'en d'autres temps on eut nommée « vitaliste »<sup>68</sup> et dans tous les cas « très partielle », des généralisations empiriques de Vernadsky établies dès 1922 (Vernadsky, 1922, 1924, 1929, ...), autour de la matière vivante et des cycles biogéochimiques.

Et Lovelock ne reconnaîtra lui aussi l'influence de Vernadsky que des années plus tard, après maintes disputes avec ses partenaires, dans une phrase pour le moins ambiguë :

Quand Lynn Margulis et moi-même avons introduit l'hypothèse Gaïa en 1972, aucun de nous n'était conscient des travaux de Vernadsky et aucun de nos plus proches collègues n'a attiré notre attention sur cette défaillance. Nous avons retracées ses étapes de recherche et ce n'est pas avant les années 1980 que nous l'avons découvert pour être notre plus illustre prédécesseur (Lovelock, 1986) [Polunin & Grinevald, 1988 ; Levit, 2007b]

Quand nous venons d'apprendre que Hutchinson, le premier des grands écologues modernes américains, avait reconnu la véritable « paternité » des concepts soutenant la Biosphère dès 1970, nous dirons alors que, pour le moins, Lovelock ne faisait pas très attention à ce qu'il se passait dans les sphères de recherche immédiatement contigües à la sienne.

Et ceci selon nous avec les mêmes explications que pour Hutchinson, à savoir qu'une révolution + une grande guerre + une guerre froide avaient établi assez de

<sup>66</sup> The Biosphere. Introducing an issue on how the earth's thin film of living matter is sustained by grand-scale cycles of energy and chemical elements. All of these cycles are presently affected by the activities of man (Hutchinson, 1970).

<sup>67</sup> Qui a développé le concept d'*endosymbiose*. Elle, a reconnu depuis, l'influence prépondérante de Vernadsky.

<sup>68</sup> Nous développerons un paragraphe à ce propos.

distance entre les deux grands blocs pour que l'on puisse penser possible (de part et d'autre) de « récupérer » idées et hypothèses du bloc opposé.

Et ils ne furent pas les seuls !

Pour toutes les raisons précédentes, nous ferons ci-après une tentative de reconstitution de l'évolution chronologique des concepts de ce courant/école depuis Podolinsky, mais en prévenant notre lecteur que celle-ci restera maladroite et qu'il y faudrait pour bien faire un épistémologue et/ou historien des sciences bien plus expérimenté que nous (et surtout multilingue !).

Sachant que notre enjeu ici n'est pas de « traquer » le faussaire, mais bien plutôt de « tracer » et reconstituer la véritable généalogie de concepts qui, aujourd'hui connus comme parties de patrimoines « nationaux », ne permettent pas pour autant de remonter à la source de portée « universelle » qui les a émis. Et de connaître ainsi le contexte global et, surtout, les racines épistémologiques de la réflexion de laquelle ils ont émergé.

Et ainsi de pouvoir si besoin corriger (rectifier) les concepts « nationalisés » des « distorsions » subies et des « oublis » plus ou moins volontaires générés lors de leur transfert (de propriété !), notamment entre l'Est et l'Ouest.

Il en fut ainsi, comme nous le verrons, des prémisses d'un métaconcept aussi fondamental que celui de « Biosphère » et de bien d'autres dans le contexte de son expression.

### 2.1.2 Lotka et le « Business » de l'énergétique

Pour le côté occidental, le premier à apparaître (après 1880) dans l'arbre généalogique relativement compliqué de notre problématique est Alfred James Lotka (1880-1949), un américain né à Lviv, ville qui se trouve aujourd'hui en Ukraine, au moment où Podolinsky revenait dans ce pays pour y mourir<sup>69</sup>. Son apport théorique contribuera fortement au futur renouveau de l'analyse énergétique, et à la naissance de l'écologie quantitative.

Jean-Sébastien Pierre (1996) nous dit comment :

Entre les deux guerres mondiales une biologie théorique s'est développée rapidement, de manière très subite et surprenante. La modélisation mathématique a pris son essor avec une telle fécondité qu'on a pu parfois parler de « l'âge d'or de la biologie théorique ». Ces modèles concernaient au premier chef l'écologie et la biologie des populations, et, sans que l'on puisse parler à proprement parler d'écoles, se sont concentrés autour de deux courants bien incarnés par Sir Ronald Fisher d'une part (avec J.B.S. Haldane, Sewall Wright, Gustave Malécot) et Alfred James Lotka d'autre part (avec Vito Volterra, Alexandre Koztitzin, G.F. Gause, Nicholson, Bailey, Kermack & MacKendrick, Charles Elton puis Leslie) [Pierre, 1996].

Il s'agissait ici d'une nouvelle discipline, la *biologie évolutionnaire* (ou *évolutive*, aussi nommée *Evo-Devo* par les Allemands), à la fondation de laquelle Lotka, mathématicien et statisticien formé à la thermodynamique, physicien avant d'être naturaliste, aura pris, à l'ouest, une part décisive. Avec notamment la célèbre « équation de Lotka » qui formera la base de la *démographie humaine* en établissant son lien avec la biologie évolutionnaire (Pierre, 1996).

---

<sup>69</sup> Avec Vernadsky, les chercheurs originaires d'Ukraine auront joué, à cette époque, dans le domaine d'une écologie émergente, un rôle dont on ne semble pas avoir souligné toute l'importance.

Mais ceci ne concernait que la période ultérieure à 1927, quand Lotka, embauché comme statisticien dans une grande compagnie d'assurance, se consacra pleinement à la démographie humaine, fondera l'*American Population Association* et accèdera à la notoriété.

Ce que ne dit pas notre auteur (Pierre, 1996), c'est que Lotka s'était d'abord appliqué, dans un anonymat relatif, à comprendre et formuler les lois de développement des populations végétales et animales.

Ses articles et publications antérieurs à 1927 le feront reconnaître cinquante ans plus tard comme un contributeur essentiel à *l'écologie des populations* et à *Systems Ecology*, l'analyse systémique appliquée à l'écologie des milieux naturels (Odum, 1983 ; Jorgensen et autres, 2007).

Pour introduire ses apports, nous tenterons en premier d'établir un lien théorique entre la critique d'Engels du business de Podolinsky, et l'analyse de Lotka d'un autre biseness, celui de *l'énergétique*, dans un premier article datant de 1921.

En 1920, Lotka entre à l'Université John Hopkins (New York), département de Biométrie et de Statistiques Vitales, dans le laboratoire de Raymond Pearl (1879-1940), alors « le » biométricien américain.

Il publie de là en 1921 sa *Note on the economic conversion factors of Energy*, qui introduit directement le sujet :

Qu'il y ait quelque relation entre l'énergie physique et la valeur économique, cela a été plus ou moins clairement reconnu par différents auteurs. Ainsi par exemple les conceptions de G. Helm d'une « énergie économique », dont le facteur de capacité est la quantité (de marchandise), et dont le facteur d'intensité est mesuré par le prix payé par unité quantitative. Une certaine justification de ce point de vue peut être trouvée d'un côté dans le fait que des biens ayant une valeur économique peuvent être échangés pour de l'énergie, et en ce sens convertis en énergie ; mais de l'autre, le mouvement des marchandises dans un système économique, c'est à dire le transfert de propriété par vente et achat, est plus déterminé par différence de valeur économique, que le transfert d'énergie d'une portion d'un système physique à une autre est déterminé par les différences de facteur d'intensité de l'énergie concernée par l'échange. Du point de vue de Helm, la monnaie représenterait la forme la plus fluide d'énergie économique, librement convertible en n'importe quelle forme d'énergie économique. Une attribution à ce rôle de la monnaie nous est aussi donnée par Oswald, qui, cependant, fait la réservation expresse que la monnaie, quoique supportant une certaine ressemblance à l'énergie, n'est cependant pas essentiellement identique. Cependant, comme nous le savons tous, la monnaie est convertible, par achat sur le marché, en différentes formes d'énergie, à des niveaux quelque peu variables, et d'une certaine manière déjà déterminés.

La question se pose donc, qu'est-ce qui détermine le ratio de conversion des différentes formes d'énergie échangées sur le marché ? [Lotka, 1921, p. 1/5].

Avant d'aborder sa réponse, voyons d'abord qui étaient Helm et Oswald. Deltete (2012) a contextualisée leur contribution à l'émergence d'une nouvelle discipline, *l'énergétique*, à la fin du XIXe siècle.

Comme le sujet de *l'énergétique* n'est pas familier aux lecteurs contemporains, un peu du contexte peut s'avérer utile. La grande question en suspens de la physique à la fin du XIXe siècle était le statut de la vision mécanique du monde. Depuis plus de deux cent ans - de Descartes, Huygens, et Newton au XVIIe siècle, à Helmholtz, Hertz, et Boltzmann à la fin du XIXe - les physiciens avaient recherché des explications mécaniques aux phénomènes naturels. C'est ainsi, alors que le XIXe siècle allait à sa fin, qu'Heinrich Hertz réaffirmait l'objectif classique de la physique théorique : « *Tous les physiciens s'accordent à ce que le problème de la physique consiste à faire remonter le phénomène de la nature aux lois simples de la mécanique* » (Hertz 1894). Mais quand ces mots sont apparus, il n'y avait en fait plus d'accord général entre les physiciens sur la nature de leur projet. Beaucoup doutaient, et quelques uns ont explicitement dénié, que la mécanique était la science la plus fondamentale ; d'autres candidats à un tel honneur - en particulier la thermodynamique et la théorie électromagnétique - étaient

sérieusement considérés ; et des alternatives globales à une vision mécanique du monde furent proposées et vigoureusement débattues entre les décennies 1890 et 1900.

L'énergétique fut une de ces alternatives<sup>70</sup>. Trouvant ses origines chez les fondateurs de la loi de conservation de l'énergie, spécialement Robert Mayer, et dans les écrits thermodynamiques de Clausius, William Thomson et Gibbs, l'énergétique était une tentative d'unification de toutes les sciences naturelles au moyen des concepts d'énergie et des lois décrivant l'énergie dans ses formes variées. Les énergéticiens croyaient que les scientifiques devaient abandonner leurs efforts de compréhension du monde en termes mécaniques, et qu'ils devaient tout aussi bien abandonner l'atomisme, en faveur d'une nouvelle vision du monde entièrement basée sur les transferts et les transformations de l'énergie.

L'émergence de l'énergétique fut largement, si ce n'est entièrement, un phénomène allemand. Ses contributeurs principaux furent Helm et Wilhelm Ostwald, les professeurs de chimie physique à Leipzig. Helm le premier a exhorté à la formulation d'une « énergétique générale » dans son *Die Lehre von der Energie* (1887)<sup>71</sup>, qui proposait à sa base un « principe énergétique » (une loi prétendument plus générale que la loi usuelle de conservation de l'énergie). Un essai de 1890 cherchait à réduire la mécanique à l'énergétique au moyen de ce principe, et un autre de 1892 visait le même objectif pour l'électricité et le magnétisme. Une note exploratoire (Helm, 1893) anticipait un livre sur le développement énergétique de la chimie physique (Helm, 1894). Ces publications, répandant plus encore l'intérêt de l'énergétique, conduiront en 1895 à la réunion de Lübeck de l'*Association Allemande des Scientifiques et Physiciens* sur « l'état actuel de l'énergétique ». Le chaud débat de la réunion de Lübeck fut un désastre pour l'énergétique, et pour Helm personnellement une malheureuse occasion. L'une et l'autre furent apparemment attaqués de tous côtés (voir Deltete, 1999). Helm fut offensé et profondément heurté. La situation empira quand les physiciens Ludwig Boltzmann et Max Planck rendirent compte de leur appréciation négative de l'énergétique dans les *Annales de Physique* ... [Deltete, 2012].

Ainsi Helm et Ostwald allaient-ils reprendre dans l'article de Lotka le rôle de Podolinsky dans le courrier d'Engels. G. Helm (1851-1923) était de la même génération que Podolinsky (1850-1891). Il avait enseigné les mathématiques et la physique depuis 1874 à Dresde, et avait obtenu son doctorat à Leipzig, en 1881. Podolinsky de son côté avait entrepris des études de physiologie à Zurich en 1872 et obtenu son doctorat de médecine à Breslau en 1876 sous la supervision de R.P.H. Heidenhain, médecin et physiologiste ; tout comme l'était H.L.F von Helmholtz (1821-1894), médecin et physiologiste allemand, qui fut dans le même temps un des fondateurs de la thermodynamique en contribuant à démontrer le principe de conservation de l'énergie. Ce qui rend tout à fait probable que Podolinsky ait été imprégné dès 1874-76 des principes de l'école allemande de thermodynamique et consécutivement de ceux de Helm et de sa future énergétique, y compris sa nouvelle vision du monde. Ceci non seulement expliquerait les origines de l'analyse énergétique mais surtout les raisons pour lesquelles Podolinsky tenta, lui aussi, de généraliser ses concepts à la formation de valeur économique !

Revenons maintenant à Lotka, qui dans la suite de son article entamait sa réponse à la question posée en revenant sur les fondements de la thermodynamique.

Le physicien est familier avec deux sortes de facteurs de conversion de l'énergie. La première sorte de facteur est ce qui entre dans l'expression analytique de la première loi de la thermodynamique, l'expression de la constance de ratio quantitatif des diverses formes d'énergie, chacune pouvant

---

<sup>70</sup> Une autre fut le *vitalisme*, que nous étudierons brièvement plus loin.

<sup>71</sup> *La Doctrine de l'Energie*, non traduit. Selon Mirowski (1989), Helm est le premier physicien à esquisser une application de l'énergétique et de la thermodynamique à l'économie et la sociologie (hors Podolinsky donc).

remplacer l'autre dans les transformations physiques. La seconde sorte de facteurs est relative à cette fraction d'énergie transformée, qui peut être récupérée sous une forme donnée, et exprime « l'efficacité » de la transformation ou du transformateur étudié. C'est une des données centrales de la thermodynamique que le *facteur d'équivalence* est toujours indépendant du mécanisme par lequel la transformation est effectuée, alors que le *facteur d'efficacité* n'est lui indépendant que dans le cas idéal d'une transformation réversible. C'est cette indépendance qui rend les deux lois de la thermodynamique si fertiles comme outils pour dresser des conclusions relatives à l'évolution des événements physiques [Lotka, 1921, p. 2/5].

Remarquons simplement à ce stade que l'Empreinte écologique emprunte la même terminologie (facteurs d'équivalence et facteurs de rendement, ou d'efficacité) pour caractériser ses deux facteurs de conversion des surfaces de l'Anthroposphère en *hectares globaux* (gha) exprimant comme nous l'avons vu (paragraphes 1.1.5.3. et 1.1.5.4.) la productivité *différentielle*, internationale et infranationale, des différents types de sols d'un pays. Rees et Wackernagel auraient-ils ainsi voulu rendre compte des deux principes de la thermodynamique, et introduire l'idée d'une « valeur universelle » de l'hectare global ?

A partir de quoi Lotka abordait les limites de la thermodynamique à rendre compte des phénomènes d'échange :

Maintenant, dans la transformation de l'énergie par échange économique sur le marché nous avons affaire à un troisième type de facteur de conversion. Les relations physiques ici impliquées sont si complexes que nous pouvons tous ensemble oublier qu'elles *sont* physiques. Et encore moins reconnaissons-nous ordinairement leur caractère précis. Un simple exemple peut aider à clarifier le problème : le cas d'une machine automatique distribuant du chocolat par insertion d'un penny dans une fente. Les facteurs saillants sont ici (1) Une quantité définie de monnaie donne en échange une quantité définie de marchandise (et d'énergie) (2) Un processus physique qui est ici un cas typique « d'action de déclenchement » dans lequel le ratio d'énergie distribuée, qui reste indépendant de l'énergie impliquée, n'est soumis à aucune loi générale de restriction que ce soit (un simple toucher du doigt pourrait déclencher des tonnes de dynamite) (3) Par contraste avec le cas des facteurs de conversion thermodynamiques, le facteur de proportionnalité est ici strictement déterminé par le mécanisme particulier employé.

La réflexion montre que toutes les sortes de transformation de la monnaie ou des biens économiques en énergie par échange sur le marché sont de cette nature. C'est toujours le cas d'une action de déclenchement [...] Et vue l'entière absence d'une quelconque loi régulant le ratio d'énergie délivrée au ratio d'énergie appliquée dans un tel cas de déclenchement, nous pouvons poser la question : qu'est-ce qu'il en est de ces facteurs de conversion économique, ratios d'échange économiques de différentes formes d'énergie, qui n'affichent aucune régularité que ce soit ? [Ibid., p. 2-3/5].

A quarante ans d'écart, et sauf à prendre des exemples différents, Lotka opposait ainsi aux défenseurs d'une énergétique extensible à l'économie, les mêmes arguments qu'Engels à Podolinsky : il existe une fracture, une rupture logique, entre valeurs d'usage et d'échange, qu'aucune loi n'explique. Sur quoi il poursuivait.

Nous avons été habitués en thermodynamique à ne plus regarder les mécanismes. En nous confrontant à la conversion d'énergie par action de déclenchement, nous devons opérer un complet changement d'attitude. Ici, tout dépend des mécanismes. Si nous trouvons un quelconque degré de régularité dans les facteurs de conversion, cela doit être dû à la régularité des mécanismes, c'est à dire l'organisme humain et ses agrégations sociales ; **et nous ne pouvons espérer faire aucun progrès dans notre compréhension des principes physiques impliqués sauf à prendre la juste mesure du mécanisme.** Compte tenu de l'extrême complexité des systèmes par lesquels les phénomènes économiques se développent, il peut paraître sans espoir de tenter l'analyse [Ibid., p. 3/5].

Notons que Lotka voulait ici aborder de nouveau les *mécanismes* par une nouvelle approche, qui induira plus tard le concept de *métabolisme*, individuel ou social, et qu'il nous faut donc chaque fois dans le texte mettre à la place de *mécanisme* pour une meilleure compréhension.

Ce en quoi, abordant leur complexité, Lotka avait à ce stade entièrement repris l'argumentation et les limites exprimées par Engels quand il opposait à Podolinsky la complexité inabordable des processus de transformation économique.

A partir de quoi il introduisait une réflexion nouvelle pour circonscrire la complexité des mécanismes.

Mais la réflexion montre que la complexité est dans les détails ; les caractéristiques détaillées qu'elle sous tend se résument d'elles mêmes en de simples lignes comparatives. L'intérêt vital de l'énergie physique émane des faits suivants : (1) Le corps d'un organisme vivant n'est *pas* en équilibre avec son environnement. En d'autres mots, le corps vivant (et aussi le corps mort, pour quelques temps après la mort, comme on le conçoit communément), dans son environnement naturel, est une source d'énergie utile (2) Bien que non en équilibre avec son environnement, le corps vivant est dans un état stable approximatif ; plus encore, c'est une des conditions essentielles pour la continuité de la vie que cet état stable approximatif soit maintenu. Les écarts extrêmes de celle-ci résultent du déplacement permanent de l'état stable, et, finalement, dans la dissipation de l'énergie utile présente dans la substance de l'organisme (3) Dans la course des événements une certaine quantité d'énergie utile, variant selon la nature de l'organisme, est inévitablement dissipée, par unité de temps. Il suit que tout organisme, pour maintenir l'état stable nécessaire à sa survie, doit être muni d'outils de capture d'énergie utile [Ibid., p. 3-4/5].

Pour contourner l'obstacle de la complexité, Lotka formulait ici ce concept aujourd'hui très avancé de la thermodynamique caractérisant le métabolisme des organismes vivants, qu'ils soient végétaux, animaux ou sociaux : la production de *distance à l'équilibre* (thermodynamique), significative d'un certain niveau de concentration interne d'énergie utile (et/ou d'ordre), stabilisé et maintenu en cet état par absorption/dissipation continue d'énergie utile (et/ou d'ordre) provenant de l'environnement.

Ce qui deviendra plus tard le thème central de la réflexion de Schrödinger (1944) dans *Qu'est-ce que la vie ?*, et encore plus tard des travaux de Prigogine (1968) sur les structures dissipatives ; avant d'être repris depuis par tous les auteurs abordant de près ou de loin la question du vivant sur un plan thermodynamique.

Cette métaphore *métabolique* de la complexité, outre son extrême pertinence, avait l'avantage de résumer en grandeurs énergétiques unifiées directement appréhendables (1<sup>er</sup> principe), l'ensemble des processus de dégradation (2<sup>ème</sup> principe) s'opérant au long de la chaîne des processus naturels, physiologiques et économiques.

Elle participait d'une *expérience de pensée* de même nature que celle réalisée quand, comme nous l'explique Schrödinger (1944), la *mécanique statistique* avait réduit l'extrême complexité des mouvements atomiques infinitésimaux à des grandeurs statistiques et des calculs probabilistes. Ceci avait permis à Boltzmann de traduire l'entropie en formule statistique ( $S = K_B Ln$ ), en associant l'entropie de Clausius à une probabilité maximale.

Ce concept de métabolisme induira 50 ans plus tard, en Allemagne notamment, le développement d'un nouveau courant de l'analyse des flux traversant l'économie. S'inspirant de la Physiocratie, ce courant s'orientera, plutôt que sur l'analyse énergétique, sur l'*analyse des flux de matières* (Material Flow Analysis - MFA) comme éléments signifiants du *métabolisme industriel* et/ou *social* (Haake, 2000 ; Mueller, 2006). Le *Wuppertal Institute* (<http://wupperinst.org/en/home/>) s'occupera tout particulièrement de cette question.

Mais dans le moment, il permettait à Lotka d'introduire dans la fin de son article de 1921 des concepts nouveaux, tant vis à vis des fondateurs de la thermodynamique que des restrictions d'Engels.

Plus loin encore, dans la compétition qui prend place entre les organismes, l'avantage doit aller à ceux dont les outils de capture d'énergie sont les plus efficaces à diriger l'énergie utile dans de tels canaux qu'ils soient favorables à la préservation des espèces [Ibid., p. 4/5].

Des notions rendant compte de l'évolution des espèces encore peu explicites, mais que Lotka poussera plus avant dans son article suivant (1922a).

En attendant, abordant les outils d'efficacité énergétique qui caractérisent l'homme, il terminera son article sur cette faculté qui le distingue de tous les autres organismes vivants (végétaux et animaux), soit *le sens des valeurs*, cette capacité spécifique de *sélection* que nous exerçons quand nous sommes confrontés dans le cours de nos actions à plus d'une alternative parmi lesquelles une seule doit être sélectionnée.

Ce qui pour Lotka ramenait à la *désirabilité*, une fonction plus largement partagée dans le domaine du vivant, dont le caractère subjectif est propre aux *goûts*, relatifs aux *besoins* spécifiques chaque espèce. Ce qui introduisait la notion de *choix* parmi les ressources naturelles comme outil de satisfaction de ces besoins.

En référence à ce choix, il avait avancé dans les paragraphes précédents le concept d'*action de déclenchement*. Elle introduisait la notion aujourd'hui évidente d'*information* (le bit d'information, égal au choix oui/non) parfaitement distincte à priori de la notion d'énergie utile, ou *libre* (Gibbs, 1902), telle qu'elle était alors partagée par les physiciens.

Puis la notion de *compétition* pour l'appropriation, directe ou indirecte, des ressources choisies, qui supposera pour l'homme l'introduction d'un médiateur, la *monnaie*, comme outil de substitution (relative) à la compétition armée pour l'appropriation et le transfert de propriété de ces mêmes ressources (stocks et flux), ne serait-ce que par ses capacités d'abolition des frontières spatiales et économiques.

Ce transfert de propriété ne signifie pas pour autant, on l'aura compris, une quelconque transformation des quantités d'énergies impliquées dans l'échange.

Ce qui introduit enfin le concept de *structure d'information*, qui induit, au long du développement, des espèces d'un côté, de la sphère socio-économique de l'autre, des *choix* de plus en plus *structurés*, d'*optimisation énergétique* (compétitifs) des ressources acquises, via l'optimisation énergétique des processus de leur utilisation/production (les moyens de production d'Engels).

D'où la notion d'*information-structure* (Passet, 1979), qui optimise les rendements énergétiques au long de ces processus d'évolution/transformation.

Ainsi les prémisses du concept d'*information*, ne serait-il pas encore parfaitement « identifié », étaient-elles pleinement contenues dans les propos que Lotka<sup>72</sup> opposait alors au *totalitarisme énergétique* de Helm<sup>73</sup>, en vue de former un couple plein d'avenir, *l'énergie et l'information*.

L'ayant ainsi « isolé », il pouvait alors le mettre de côté pour aborder d'une manière entièrement renouvelée la question de *l'énergétique*.

Ce qu'il fera dans ses deux articles suivants, *Contribution to the Energetics of the Evolution* et *Natural selection as a physical principle* (Lotka, 1922a, b).

---

<sup>72</sup> Dans son ouvrage *Elements of physical biology* (Lotka, 1925), qui restera sans suite, il ira jusqu'à aborder de concept de *conscience*, comme émergeant du processus de sélection des espèces.

<sup>73</sup> Qui cependant, comme nous le verrons, contenait lui aussi des concepts révolutionnaires, tant pour son époque que pour la nôtre.

### 2.1.3 Vers une « direction » de l'évolution

Etudions tout d'abord le premier, avant d'étudier le second quelques paragraphes plus loin, après avoir épuisé le thème d'une énergétique de la nature.

Lotka (1922a) y positionnait l'énergétique, et avec elle la chimie physique, vue comme science de la *dissipation énergétique*, face à la biologie physique (ou évolutionnaire), comme science potentielle de la *production énergétique*.

Il a été souligné par Boltzmann que l'objet fondamental de discordance dans la lutte pour la vie, dans l'évolution du monde organique, est l'énergie utile. En accord avec cette observation est le principe que, dans la lutte pour l'existence, l'avantage doit aller à ceux des organismes dont les outils de capture de l'énergie sont les plus efficaces à diriger l'énergie utile dans des canaux favorables à la préservation de l'espèce. Le premier effet de la sélection naturelle opérant ainsi dans la compétition des espèces sera de donner une prépondérance (en nombre ou masse) aux espèces les plus efficaces en guidant l'énergie utile de la manière indiquée. Ce sera la *direction* du flux d'énergie à travers le système qui sera ici principalement affectée.

Mais les espèces possédant des capacités supérieures de capture d'énergie peuvent accomplir quelque chose de plus que de tourner à leur avantage l'énergie pour laquelle elles sont en compétition avec les autres espèces.

Si les sources présentes sont capables d'offrir de l'énergie utile en excès de celle exploitée par le système global des organismes vivants, une opportunité est alors donnée aux organismes constitués de manière appropriée, d'agrandir le flux total d'énergie traversant le système. Partout où de tels organismes apparaissent, la sélection naturelle opérera de telle manière à les préserver et les multiplier. Le résultat dans ce cas n'est pas une simple diversion du flux d'énergie du système de nature organique dans une nouvelle *direction*, mais une augmentation du flux total d'énergie à travers ce système [Lotka, 1922a, p. 1/4].

N'avions-nous pas ici les prémisses d'une nouvelle *théorie de l'accumulation énergétique* ?!

Ces quelques lignes joueront un rôle considérable dans les développements ultérieurs de la science écologique.

En 1872, Maxwell, lui aussi par une *expérience de pensée*, avait opposé au second principe son célèbre « démon » dans les termes suivants :

Limitation du second principe de la thermodynamique - L'un des faits les mieux établis de la thermodynamique est qu'il est impossible, sans dépenser de travail, de produire une inégalité de température ou de pression dans un système enfermé dans une enveloppe, ne permettant ni changement de volume, ni passage de chaleur. C'est là le second principe de la thermodynamique et il est indubitablement vrai aussi longtemps que nous n'opérons que globalement avec les corps, tant que nous n'avons pas la possibilité de percevoir ou d'agir sur les molécules individuelles dont ils sont constitués [Bonsack, 1961].

Il supposait là que le mystère de l'entropie ne résidait que dans les limites de la science de son époque, incapable d'examiner l'infiniment petit, et donc les causes réelles de ce désordonnement interne. Et que, peut-être, on trouverait bientôt les moyens de faire revenir en arrière le sens de cette entropie, ce qu'il se permettait ensuite d'imaginer :

Mais si nous concevons un être dont les facultés seraient si aiguisées qu'il puisse suivre chaque molécule dans sa course, un tel être, dont les attributs sont pourtant aussi essentiellement finis que les nôtres, serait capable de faire ce qui nous est actuellement impossible. Car nous avons vu que les molécules emplissant un récipient plein d'air à température uniforme se meuvent avec des vitesses qui sont loin d'être uniformes. Supposons maintenant qu'un tel récipient soit divisé en deux portions, A et B, par une paroi dans laquelle il y aurait un petit trou, et qu'un être qui peut voir les molécules individuelles ouvre et ferme ce trou, de manière à laisser passer seulement les molécules les plus rapides de A à B, et seulement les molécules les plus lentes de B à A. Il élèvera ainsi, sans

dépense de travail, la température de B et abaissera celle de A, en contradiction avec le second principe de la thermodynamique [Ibid.].

Un démon aux facultés si aiguës qu'il troublera pendant longtemps les tenants d'un second principe irréfutable.

Et puis là, un mathématicien et statisticien, expert de la thermodynamique, vérifiait les facultés de ce démon en formulant une « généralisation empirique »<sup>74</sup> dont le résultat immédiat n'était pas une nouvelle usure entropique de l'Univers, mais bien plutôt un abaissement du flux d'entropie, ou plus exactement un développement d'entropie négative<sup>75</sup>.

La *biologie physique* (ou *évolutionnaire*) apparaissait ainsi pour Lotka comme propre à souligner la *production* énergétique des organismes vivants<sup>76</sup>, en complément des (ou en contradiction avec les ?) formules et lois de *dissipation* énergétique de la *chimie physique*. Et dans tous les cas en parfaite contradiction avec la loi de Liebig !

Suite de notre lecture :

Mais encore, aussi longtemps que les sources existent, capables de fournir de la matière, d'un caractère adapté à la composition des organismes vivants, en excès de celle actuellement incorporée dans le système de nature organique, aussi longtemps une opportunité est fournie pour les organismes de constitution adaptée d'agrandir la masse totale du système de nature organique. Partout où de tels organismes apparaissent, la sélection naturelle opérera de telle manière à les préserver et les multiplier, toujours à la condition qu'il y ait une réserve d'énergie utile inexploitée.

Le résultat sera d'augmenter la masse totale du système, et aussi, avec cette masse totale, le flux total d'énergie à travers le système, à partir de quoi, toutes choses restant égales par ailleurs, cette énergie est proportionnelle à la masse du système.

Quand une limite, qu'elle soit constante ou de faible variation, est imposée à la masse totale nécessaire à l'opération des processus vivants, l'énergie utile par unité de temps (puissance utile) mise à la disposition des organismes pour leurs fonctions de vie et de compétition, peut évoluer en développant le niveau de renouvellement de la matière organique à travers le cycle de vie [Lotka, 1922a, p. 2/4].

<sup>74</sup> Voici comment Vernadsky (1929, paragraphe 15, p. 69) caractérise les **généralisations empiriques** : « Il existe une énorme différence entre les généralisations empiriques et les hypothèses scientifiques ; l'exactitude de leurs déductions est loin d'être identique. Dans les deux cas, généralisations empiriques et hypothèses scientifiques, nous nous servons de la déduction pour arriver à des conclusions, que nous vérifions par l'étude des phénomènes réels. Dans une science de caractère historique comme la géologie, on procède à cette vérification par l'observation scientifique.

La différence entre les deux cas tient à ce que la généralisation empirique s'appuie sur des faits amassés par voie inductive : cette généralisation ne dépasse pas les limites des faits et ne se soucie pas de l'existence ou de la non-existence d'un accord entre la conclusion tirée et nos représentations de la Nature. Sous ce rapport, il n'existe pas de différence entre la généralisation empirique et le fait établi scientifiquement : leur concordance avec nos représentations scientifique de la Nature ne nous intéresse pas, mais leur contradiction avec elles constituerait une découverte scientifique.

Bien que certains caractères des phénomènes étudiés ressortent au premier rang dans les généralisations empiriques, l'influence de tous les autres caractères du phénomène se fait toujours infailliblement sentir.

La généralisation empirique peut faire longtemps partie de la science, sans pouvoir être expliquée par aucune hypothèse, demeurer incompréhensible, et exercer pourtant une influence immense et bienfaisante sur la compréhension des phénomènes de la Nature.

Mais ensuite arrive un moment où une lumière nouvelle éclaire soudain cette généralisation ; elle devient le domaine de créations d'hypothèses scientifiques, commence à transformer nos schémas de l'Univers et à subir à son tour des changements. Souvent alors, on constate que la généralisation empirique ne contenait pas en réalité ce que nous avons supposé ou que son contenu était bien plus riche. Un exemple frappant en est l'histoire de la grande généralisation de D. J. Mendeleef (1869), du système périodique des éléments chimiques, qui, après 1915, année de la découverte de J. Moseley, est devenue un champ étendu de l'activité des hypothèses scientifiques ».

<sup>75</sup> Le terme ne sera introduit, plus tard, que progressivement. Schrödinger (1944) parlera de « néguentropie », Wiener en 1950 d'« entropie négative », et Brillouin en 1956 de « nég-entropie ».

<sup>76</sup> Nous verrons que ce concept énergétique de la biologie évolutionnaire est apparu préalablement en Russie..

Lotka abordait maintenant un processus d'intensification dynamique de la *masse* des écosystèmes, en relation étroite avec, mais différencié de leur intensification énergétique. Il prendra à la suite pour le préciser un exemple emprunté à l'agriculture américaine, qui, sans augmenter la capacité de production d'une surface agricole, était susceptible d'intensifier sa production par unité de temps (sa *puissance* de production) en augmentant le nombre de rotations annuelles.

En précisant cette différence relative masse/énergie, ce passage comportait une nouvelle allusion à l'*énergétique* de Helm, qui postulait une équivalence de l'énergie et de la masse (Deltete, 2012), qui pourrait avoir un certain rapport avec la célèbre équation d'Einstein.

Puis Lotka récapitulait les apports de son article :

*Pour récapituler* : Dans chacune des circonstances considérées, la sélection naturelle opérera ainsi de telle manière à augmenter la masse totale du système organique, à augmenter le niveau de circulation de la matière à travers le système, et à augmenter le flux total d'énergie à travers le système, aussi longtemps qu'il existe un résidu inutilisé de matière et d'énergie utile.

Cela peut être exprimé en disant que la *sélection naturelle* tends à rendre maximum le flux d'énergie à travers le système, aussi loin que cela reste compatible avec les contraintes auxquelles le système est confronté.

Il n'est pas licite d'en déduire immédiatement que *l'évolution* tends ainsi à maximiser ce flux d'énergie. Parce que dans l'évolution, deux sortes d'influence sont au travail : les influences de sélection, et les influences de génération. La première sélectionne, la seconde fournit le matériel de la sélection.

Si le matériel fourni pour la sélection est strictement limité, comme dans le cas d'une simple réaction chimique, qui donne naissance à un nombre fini de produits, la gamme d'opération des influences sélectives est également limitée. Dans le cas de l'évolution organique, la situation est très différente. Nous n'avons pas de raison de supposer qu'il y ait aucune limite finie au nombre de types possible d'organismes.

Regardant les influences de génération qui fournissent le matériel à la sélection naturelle pour l'évolution organique, et dans l'état présent de notre connaissance, ou plutôt de notre ignorance, un élément d'incertitude entre ici.

Il apparaît, cependant, au moins probable *à priori* que, entre la variété certainement très large (si ce n'est infinie) de types d'organismes offerts à la sélection, tôt ou tard viendront ceux qui offriront à la sélection l'opportunité d'opérer dans la direction indiquée, à savoir de telle manière à augmenter la masse du système, le niveau de circulation de la masse à travers le système, et le flux d'énergie totale à travers le système.

Si cette condition est satisfaite, *la loi de la sélection* devient aussi *la loi de l'évolution* :

L'évolution, dans ces circonstances, procède dans une direction telle à rendre le flux d'énergie total à travers le système au maximum compatible avec les contraintes [Ibid., p. 2-3/4].

Lotka formulait ainsi une « direction de l'évolution » inverse à la *flèche du temps* d'Eddington. Où deux éléments intervenaient conjointement : (1) les espèces, leur nombre et leur variabilité, et ce faisant des influences sélectives développant des capacités de *choix* de plus en plus nombreuses et structurées (2) la masse et l'énergie apportées comme nutriments des capacités sélectives.

Ce qui précisait d'autant, par rapport à l'article précédent, l'intervention de l'information et de la compétition comme élément vitaux de l'intensification du cycle de production d'énergie, dans l'évolution des espèces et la direction de cette évolution.

Desquels émerge une notion primitive de « diversité biologique » qui va nous mener à souligner les travaux d'un autre américain, contemporain de Lotka, Frederick E. Clements.

Lotka en attendant apportait à la fin de cet article un étonnant soutien aux hypothèses de Podolinsky formulées 40 ans auparavant. Ceci au point de ... sembler répondre aux critiques d'Engels !

Nous avons ainsi apportée, sur une base déductive, une réponse au moins préliminaire à la question proposée par l'auteur dans une publication antérieure. Il était là signalé que l'influence de l'homme, comme espèce la plus efficace dans la lutte compétitive, semble avoir accélérée la circulation de matière à travers le cycle de vie, à la fois en « élargissant la roue », et en la faisant « tourner plus vite ». **La question a été soulevée** de savoir si l'homme a inconsciemment accompli en cela une loi de nature, s'accordant à ce que quelque quantité dans le système tende vers un maximum. Ce qui est maintenant rendu probable [Ibid., p. 3/4].

Cette réponse, Lotka promettait de l'approfondir dans son article suivant, de la même année 1922.

Mais il y introduira une nouvelle dimension que nous n'aborderons pas avant d'avoir élargi le contexte dans lequel, ces années là, était apparu, des deux côtés de l'atlantique, face à une évolution livrée au hasard, le concept nouveau d'une « directionnalité » de cette évolution.

Lotka en effet ne prêchait pas dans le désert, et il y avait eu des chercheurs avant lui pour introduire ces idées, comme il y en aura d'autres après lui pour les approfondir.

#### 2.1.4 Les « successions » vers le climax

Avant lui, Frederick E. Clements (1874-1945) fut d'abord professeur de botanique à l'université du Nebraska avant d'entrer au *Carnegie Institute de Washington* où il y fera figure de grand précurseur de l'écologie moderne.

Il publia en 1916 son ouvrage *Plant succession, an analysis of development of vegetation* (Clements, 1916), où il présente le concept de *succession*, comme une continuité parfaitement dirigée des étapes *successives* de *stabilisation* des différents stades végétatifs d'un écosystème, en vue de la formation d'un *climax*, vu comme une entité organique.

Ce qui, ramené à l'échelle d'un écosystème, ressemble fort à *l'hypothèse Gaïa* de Lovelock (1973, 1979), en ce qu'elle conçoit la terre comme un organisme vivant. Et ce qui constituait une hypothèse « organiciste » qui sera forcément suspectée de *vitalisme*, en une ère des Lumières « scientifiques » qui s'en méfiait comme de la peste.

Clements introduisait ceci dit plusieurs dimensions significatives de la phylogénèse d'un couvert végétal, et sur lesquelles Lotka aurait pu fort bien se pencher avant l'écriture de son premier article de 1922. Comme Clements l'écrit lui même :

*Succession* : La nature essentielle de la succession est indiquée pas son nom. C'est une série d'invasions, une séquence des communautés de plantes marquée par le changement depuis des formes de vie plus basses vers de plus hautes. L'essence de la succession est liée à l'interaction de trois facteurs, nommément l'habitat, les formes de vie, et les espèces, dans le développement progressif d'une formation. Dans ce développement, l'habitat et la population agissent et réagissent l'un par rapport à l'autre, alternant causes et effets jusqu'à ce qu'un stade d'équilibre soit atteint [...] La succession peut ainsi être regardée comme le développement ou l'histoire de vie de la formation du climax. C'est le processus organique basique de la végétation, qui résulte en une forme adulte ou finale de cet organisme complexe. Tous les stades qui précèdent le climax sont des stades de croissance [...] Chaque stade est, temporairement au moins, une structure stable, et le processus actuel peut être seulement révélé en suivant le développement d'un stade dans celui qui lui succède [...] *Stabilisation* : L'invasion progressive typique d'une succession produit partout de la stabilisation [...] La stabilisation est si universelle et caractéristique qu'elle peut bien être regardée comme synonyme de succession [...] *Causes de stabilisation* : La cause essentielle de la stabilisation est la

dominance [...] La dominance est ainsi la capacité d'une forme de vie caractéristique de produire une réaction suffisante à contrôler la communauté pour une période. La dominance peut vouloir dire le contrôle des facteurs du sol seuls, premièrement le contenu en eau, ou des facteurs air, spécialement la lumière, ou à la fois l'eau et la lumière. Les formes de vie initiales comme les algues, les lichens, et les mousses sont caractéristiques mais non dominantes, du fait que la réaction qu'elles produisent les prémunisent contre le contrôle plutôt que de le réaliser. C'est la différence essentielle entre les stades initiaux et finaux de la succession. Alors que toutes réagissent vis à vis de l'habitat, la réaction des unes favorise les envahisseurs, alors que celle des autres les repousse [...] *Relation au climax* : Le fin du processus de stabilisation est un climax. Chaque stade de la succession joue un rôle en réduisant les conditions extrêmes dans lesquelles la série commence. Il réagit en produisant des conditions de croissance toujours meilleures, ou au moins des conditions favorables à la croissance d'une plus large gamme d'espèces [...] La conséquence est que l'effet de la stabilisation sur l'habitat est de le rapprocher constamment de conditions mésophytes [...] L'effet sur la population des plantes est correspondant [...] Pour cette raison le nombre d'espèces et d'individus croît plus largement à chaque stade successif, jusqu'à ce que la domination finale de la lumière, par exemple, devienne restrictive [...] Le résultat final dans chaque série est la culmination d'une population plus complètement adaptée aux conditions mésophytes. Un tel climax est permanent à cause de son entière harmonie avec un habitat stable. Il persistera aussi longtemps que le climat restera inchangé, faisant toujours que la migration n'amène pas à un nouveau dominant d'une autre région... [Clements, 1916].

Clements montre bien dans ce texte, qui donnait des bases solides au futur concept de *biodiversité*<sup>77</sup>, comment la succession procède dans une direction telle à adapter, par optimisations successives des strates végétales, l'écosystème aux contraintes pédoclimatiques, et ce faisant à maximaliser sa masse végétale.

Il aurait ainsi suffi à Lotka de traduire cette direction en termes énergétiques, comme notamment la *stabilisation*, concept partagé avec Cléments, pour représenter, pour ce dernier un stade de croissance, et pour Lotka une distance déterminée à l'équilibre thermodynamique.

Ce développement ferait de la *succession* (vers un climax) le pendant naturaliste préalable à la *direction de l'évolution* selon Lotka.

Il y apparaîtrait que si les masses énergétiques primitives se sont développées avec les premiers autotrophes, ce stockage énergétique se serait considérablement intensifié avec les hétérotrophes et la structuration *différentielle* des espèces.

*Tous éléments tendant à nous signaler l'existence d'une corrélation étroite entre la diversité biologique et l'optimisation/ maximisation en masse et énergie d'un écosystème naturel !*

Et donc entre un niveau d'*information-structure* et un niveau d'énergie !

## 2.1.5 Un courant russe de la « directionnalité »

### 2.1.5.1 De la force « vitale » à l'énergie biogéochimique

Sortons maintenant des Etats Unis pour élargir notre étude au contexte allemand et surtout russo-soviétique. George Levit (2004, 2007a, 2007b) a étudié les origines et le développement de la biologie évolutionnaire en Allemagne et en Russie, étendant à leur contexte les constats anglo-saxons de Jean-Sébastien Pierre (1996) concernant « l'âge d'or de la biologie théorique ».

---

<sup>77</sup> L'expression *diversité biologique* ou *biodiversité* est apparue au début des années 1980.

En Allemagne, ce développement aura lieu autour de l'*Ecole de Jena* (Iéna en Français), initiée par Ernst Haeckel (1834-1919), défenseur principal du Darwinisme en Allemagne au XIXe siècle, qui avait formulé en 1872 une loi biogénétique déclarant que *l'ontogénèse* récapitule *la phylogénèse* (Levit, 2004, 2007).

Nous avons survolé (paragraphe 2.1.2.) les débats qui, entre 1890 et 1900, s'engagèrent, notamment en Allemagne, après qu'Heinrich Hertz ait réaffirmé l'objectif classique de la physique théorique :

Tous les physiciens s'accordent à ce que le problème de la physique consiste à faire remonter le phénomène de la nature aux lois simples de la mécanique (Hertz, 1894) [Deltete, 2012].

Affirmation qui anticipait les paroles définitives de Sir Arthur Eddington en 1905.

Ces débats opposèrent ainsi aux *mécanistes* diverses alternatives, dont l'*Energétique*, de Helm et Oswald, premier pont possible entre la physique et la nature, contre laquelle réagissait Lotka (1921).

Ainsi que le *Vitalisme* !

Pouvreau (2013), dans sa thèse sur la *Systémologie générale* de Ludwig von Bertalanffy, a reconstitué pour nous le contexte de ce débat du XIXe siècle, contre le mécanisme, dans lequel émergea le vitalisme :

[Le XIXe siècle] s'ouvrit avec le baptême de la science du vivant par le nom de « biologie » en 1802. Jean-Baptiste Lamarck, tout en étant l'un des créateurs du terme, désigna simultanément le concept fondamental qui instituait dans sa spécificité la science auquel il référait, *l'organisation*. La pensée de Lamarck était le fruit d'une longue maturation. À l'hylozoïsme dominant dont la « grande chaîne de l'être » était le paradigme, qui répartissait les êtres en trois règnes continûment reliés (animal, végétal et minéral), certains naturalistes tels que Georges L.L. de Buffon et Antoine L. de Jussieu avaient dès la seconde moitié du XVIIIe siècle opposé avec une insistance croissante la nécessité d'un « critère certain qui sépare le vivant du non-vivant en même temps qu'il unifie plantes et animaux dans un seul règne ». Et ce fut déjà dans l'organisation qu'ils le trouvèrent, instaurant ainsi la dichotomie entre le règne « organique » des êtres vivants et celui, « inorganique », des minéraux. L'identification de la vie à l'organisation fut dès lors caractéristique de tout le XIXe siècle, de Lamarck – selon qui « la vie constitue un phénomène physique lié à l'organisation » – à Claude Bernard en passant par Pierre A. Bécлар, lequel put définir la vie comme « l'ensemble des phénomènes propres aux corps organisés » et semble d'ailleurs avoir été, en 1823, l'inventeur du terme d'« organicisme ». Cette approche n'allait toutefois pas sans de profondes ambiguïtés. L'organon désignant en grec l'« instrument », le concept d'organisation inclut en effet d'emblée celui de finalité : le trait téléologique lui est inhérent. L'organisation est au fond toujours assimilable à une finalisation, son concept posant donc le problème de l'immanence ou de la transcendance de son origine. Dans la métaphore cartésienne de l'organisme comme « machine », la téléologie était renvoyée à l'opération extérieure d'un Dieu « ingénieur ». Conserver cette métaphore sans recours à la théologie conduisait alors soit à récuser toute téléologie comme illusoire et à chercher à rendre compte de la finalité apparente des phénomènes biologiques à partir de moyens purement naturalistes (mais pas nécessairement réductionnistes), ce qui finissait toujours par rendre le concept d'organisation ambigu ; soit à la réintroduire par une autre porte en postulant dans une perspective non naturaliste l'action de « forces vitales » spécifiques ayant pour fonction de finaliser le comportement de la matière organique. Le problème semble bien d'avoir été la difficulté de penser l'organisation en rupture avec le modèle « machinaliste ». La biologie du XIXe siècle demeura largement confrontée à cette difficulté en des termes que Bichat illustra typiquement par la manière dont il décrivit les animaux (des « assemblages d'organes » et des « machines particulières »), alors même qu'il put en parallèle définir la vie comme tout ce qui combat le mort. Lamarck lui-même préserva d'ailleurs le modèle de l'horloge. Sans doute faut-il admettre à la suite de la philosophe Judith Schlanger qu'en dépit du Romantisme, qui désigna de manière inédite le mécanisme comme le « mort » et de la sorte « s'inventa la machine comme adversaire », « la pensée de l'organisme ne se comprend pas par opposition au thème de la machine, parce que l'un et l'autre sont des figures

d'organisation et donc d'harmonie ». L'illustrent bien les écrits du zoologiste Yves Delage : aspirant à réhabiliter le terme d'« organicisme », il définit en effet en 1903 l'organisme vivant comme un ensemble de parties contribuant de manière indépendante à la formation d'une totalité en donnant ainsi l'illusion d'une harmonie préétablie – c'est à dire... comme une machine. André Lalande résuma bien la confusion qui régnait encore au début du XXe siècle lorsqu'il écrivit que l'organicisme, alors défini comme la doctrine opposée au vitalisme tenant la vie pour « le résultat de l'organisation », pourrait s'entendre soit au sens où « la vie résulte mécaniquement de la configuration et du jeu des organes », soit au sens où « chaque organe est doué de propriétés vitales qui lui sont propres ». L'historienne Evelyn Fox Keller n'est probablement pas loin de la vérité lorsqu'elle considère que le XIXe siècle a légué au suivant son échec à définir la vie : les controverses du début du XXe siècle peuvent apparaître comme l'aboutissement de cet échec [Pouvreau, 2013 :75-76].

C'est dans un tel contexte qu'un étudiant de Haeckel, Hans Driesch (1867-1941), de l'école de Jena, opposa dès 1891 ses résultats expérimentaux vérifiant l'*épigénèse* au *préformisme* de Wilhelm Roux (1850-1924), un autre élève de Heckel.

L'épigénèse est une théorie *téléomécaniste* initiée par Blumenbach (1752-1840) en collaboration avec Kant, qui stipule qu'un embryon se développe en devenant de plus en plus complexe selon un schéma *vital* préexistant.

Le préformisme prétendait, par la physiologie, pouvoir transformer l'embryologie en une « mécanique du développement ». Non plus une embryologie descriptive, mais une science expérimentale isolant les différents facteurs causaux impliqués dans la différenciation progressive, qui voyait l'embryon comme un être vivant « miniature » où tous les organes sont déjà physiologiquement présents, et qui, d'un œuf, fait advenir un organisme complexe (Pouvreau, 2013).

Et c'est en défendant l'idée d'une « force vitale » indéfinissable qui dirige le développement des organismes, que Driesch fonda ainsi le *néo-vitalisme*. Devenu chef de file des vitalistes allemands, le débat qu'il engagea, tant avec son professeur qu'avec son collègue, tourna au vinaigre pour former à la fin des années 1890 l'une des plus importantes controverses du XIXe siècle (Bayles, 1990:40).

Ce débat instaurait au cœur même de l'école de Jena des mouvements de pensée pour le moins contradictoires quant à la théorie de l'évolution, qui ne manquèrent pas d'influer sur la position future de ce que nous avons nommé (à défaut d'une école parfaitement identifiée) *le courant russe de la directionnalité*.

Un troisième élève de Heckel fut en effet Alexeï N. Sewertzoff (1866-1936), fidèle à priori au Darwinisme selon Heckel, qui dirigera l'école russe de la biologie évolutionnaire.

Aura t-il constaté dans les violents débats contradictoires, tant autour de *l'énergétique* de Helm que du *vitalisme* de son collègue Driesch, qui se déroulaient autour de lui, cet échec signalé par Pouvreau ? Et à partir de là aura t-il recherché une nouvelle alternative évolutionnaire, tout même temps opposable au mécanisme et cohérente avec l'évolution selon Darwin ? Nous n'avons pas les moyens de le vérifier.

Toujours est-il que, une fois en Russie, il tentera une première synthèse évolutionnaire intégrant au Darwinisme une nouvelle hypothèse de développement morphologique qui, sans pour autant se référer à des *forces vitales*, rendait compte des dynamiques en action dans la nature en se fondant sur *l'énergie vitale* des organismes vivants.

Sa théorie de l'*aromorphose* initiera ainsi une nouvelle *énergétique du vivant*, qui sera plus tard généralisée par Wladimir Vernadsky jusqu'au concept de Biosphère, vu comme une application universelle (à l'échelle terrestre !) de la *directionnalité* de l'évolution.

Ceci nous mène à la Russie impériale, puis soviétique.

Le développement de la biologie évolutionnaire prendra à partir de Sewertzoff deux voies différentes, dont Ivan Schmalhausen (1884-1963) formera l'interface, et qui aboutiront chacune sur une *grande synthèse*.

La première, entamée par Sewertzoff, sera une voie d'approfondissement et de spécialisation qui mènera à la création de la branche russe de la *morphologie évolutionnaire*, jusqu'à cette synthèse intégrant au Darwinisme le concept d'*aromorphose* (que nous étudierons brièvement plus loin). A partir de quoi Schmalhausen son meilleur étudiant, reprendra et reformulera ses travaux pour aboutir à une première synthèse évolutionnaire (russe), qu'un de ses jeunes condisciples, Théodosius Dobzhansky (1900-1975), biologiste et généticien d'origine ukrainienne, apportera aux Etats Unis pour initier la *synthèse évolutionnaire moderne*<sup>78</sup>.

La seconde sera une voie d'élargissement et d'intégration interdisciplinaire, favorisée par la proximité initiale entre Schmalhausen et Vernadsky (dont nous aborderons l'œuvre dans un prochain paragraphe). Schmalhausen apportera en effet ses connaissances à un groupe de scientifiques éminents qui, tout en développant chacun des concepts fondateurs des sciences de la nature propres à leur spécialité, fonderont tous ensemble, après 1930, autour de Vernadsky et de son concept de *Biosphère* la branche russe (soviétique) des sciences de la vie (Bailes, 1990 ; Levit 2007b). Comme en témoigne Levit :

Après l'éclatement de la guerre avec l'Allemagne (22 juin 1941), Vernadsky fut évacué à la station thermale de Borovoje au Kazakhstan. Les deux années à Borovoje furent hautement productives [...] A Borovoje plusieurs scientifiques exceptionnels vinrent vivre et travailler ensemble, comme par exemple, le fondateur de la théorie de la nomogénèse (théorie de l'évolution dirigée) et de la théorie des zones géographiques Leo (Lew) S. Berg (1876-1950), le fondateur de la théorie de la biogéocénose comme unité élémentaire de la biosphère, Vladimir Sukachov (1880-1967), et un des architectes de la synthèse évolutionnaire russe Ivan Schmalhausen (1884-1963). Comme il est clairement documenté, ils ont tous expérimenté l'influence de Vernadsky et ont tous joué un rôle crucial dans la croissance des sciences russes de la vie, incluant diverses branches de l'écologie [Levit, 2007b].

---

<sup>78</sup> La *Synthèse évolutionnaire* (ou synthèse néodarwinienne, ou néodarwinisme) fut le produit d'une quête d'*unification de la Biologie*, dont l'accouchement fut vraiment difficile, menée aux Etats Unis au cours des années 1930 et 1940 par un groupe d'éminents biologistes, dont R.A. Fisher, Ernst Mayr, Julian Huxley et Théodosius Dobzhansky. C'est à Dobzhansky que l'on devrait son initiative, après qu'il eut émigré en 1927 aux Etats Unis (Mellender de Araujo, 2004 ; Konashev, 2006). Alors jeune étudiant à l'Université de Kiev, il avait assidument fréquenté, dans les années très troublées qui suivirent immédiatement la révolution d'octobre, à la fois Ivan Schmalhausen, second artisan de la synthèse russe, qui présidait alors cette Université, et Wladimir Vernadsky, qui venait de la fonder à la suite de la création de l'Académie des sciences d'Ukraine, et avait nommé Schmalhausen à sa tête. Alors qu'ils fuyaient la *Tcheka*, la police politique soviétique, qui était dans les années 1918-1921 en train de contrôler l'ensemble du territoire russe, Schmalhausen et Vernadsky se réfugièrent à Kiev puis dans ses environs. Dobzhansky leur apporta son infatigable assistance (comme aller chaque jour chercher à pied de la nourriture à plusieurs kilomètres à la ronde) alors qu'ils étaient cachés dans la campagne. Il en retirera un soutien évident dans la suite de sa carrière, qui lui permettra en quelque sorte d'hériter de cette synthèse, qu'en tant que *russes blancs*, Schmalhausen et Vernadsky se seraient vu disposés à voir émigrer vers les Etats Unis, avant que Staline prenne le contrôle absolu sur la fuite des cerveaux et de leur contenu (Bailes, 1990:145-147).

Ce qui caractérisera cette branche russe des sciences de la vie, et qui n'a pas été pointé à notre connaissance par les historiens des sciences occidentaux, c'est que ces différents chercheurs développeront ensemble un courant de pensée relatif à une *directionnalité de l'évolution*, qui élargira<sup>79</sup> aux deux blocs opposés de l'Occident la réaction à une *évolution hasardeuse* selon Darwin et, en toute logique, au second principe.

Partant comme Clements d'une vision strictement naturaliste, ce courant en viendra par étapes à une formalisation de nature thermodynamique à l'exemple de Lotka, mais tellement plus aboutie et généralisée que nous pourrions nous demander qui fut réellement à l'origine de ses propositions.

Nous allons tenter d'identifier les membres principaux de ce courant russe de la directionnalité, comme participant d'un mouvement collectif, aussi explicitement que la directionnalité apparaît chez Lotka comme une initiative personnelle.

Il nous faut pour ce faire revenir au mentor d'Ivan Schmalhausen, A.N. Sewertzoff, qui aurait été le père effectif de la *direction de l'évolution*.

### 2.1.5.2 A.N. Sewertzoff et la théorie de l'*aromorphose*

Alexei N. Sewertzoff (1866-1936), fut un membre éminent de l'Académie des sciences russe (puis d'URSS). Il a fondé de nombreux laboratoires dont l'Institut de Paléontologie, et l'Institut de Morphologie Evolutionnaire qui fut plus tard réorganisé en l'Institut A.N. Sewertzoff d'Ecologie et Evolution, qui est aujourd'hui, avec plus de 700 membres, l'un des plus grands instituts mondiaux d'écologie (Levit et autres, 2004).

Ce qui nous concerne particulièrement dans l'ensemble de ses travaux est son concept d'*aromorphose*, dont l'expression apparaît dans sa publication de 1914 : *Le problème contemporain de la théorie de l'évolution* (titre traduit du Russe). Levit et autres (2004) nous expliquent le contenu de cette théorie, qui n'est disponible qu'en langue russe.

L'*aromorphose* est une évolution progressive rapide et un événement de signification macro-évolutionnaire crucial. Comme Schmalhausen, qui a adopté cette notion de son mentor le formule : « L'*aromorphose* représente des processus évolutionnaires libérant les organismes des restrictions excessivement fortes de l'environnement ... L'organisme devient plus actif et capable de contrôler les ressources vitales » [...] La caractéristique essentielle de l'*aromorphose* est une augmentation du degré d'organisation de la forme vivante, menant à une augmentation radicale de l'intensité du processus de vie (« énergie vitale » dans le vocabulaire de Sewertzoff) [Levit et autres, 2004].

Un premier constat, qui deviendra important pour la suite de notre propos, est que l'*aromorphose*, vu comme processus « endogène » propre aux organismes vivants, s'étendrait par défaut à l'ensemble des organismes d'un écosystème pour devenir un processus « exogène » participant de l'écosystème lui-même, vue comme entité organique.

Mais nous avons appris que Schmalhausen avait réinterprété la théorie de son mentor, et ne reflétait plus entièrement son intention initiale, plus en rapport avec notre propos. Ce pourquoi nous donnerons deux interprétations complémentaires.

La première, formulée par Zotin (1978, 1984), un expert russe de la biologie évolutionnaire et de la *thermodynamique des processus biologiques* met beaucoup mieux en relief la portée « énergétique » du concept.

---

<sup>79</sup> Ou qui plus globalement et vraisemblablement l'aura « initiée » ? C'est une partie importante de la question à propos de cette « école » dont en Occident nous ne savons rien !, quand ses travaux, autour de la biogéochimie, apparaissent aujourd'hui si fondamentaux dans l'approfondissement de nos connaissances sur le vivant.

Selon A.N. Severtsov, l'aromorphose est un changement adaptatif des organismes qui se traduit par une augmentation d'énergie totale de l'activité vitale de la progéniture adulte. L'aromorphose est une organisation plus complexe des organismes, une élévation à un plus haut niveau, qui permet aux organismes de faire un meilleur usage de leur environnement et/ou d'étendre la distribution spatiale des espèces. L'aromorphose est avant tout liée à une augmentation de l'énergie et de l'activité vitale des organismes [Zotin et autres, 1978:344].

La seconde, formulée par Grinin et autres (2009), de l'Institut de Paléontologie de Moscou, fondé par Sewertzoff, fait de l'aromorphose un concept d'*accomplissement biologique* établissant une corrélation étroite entre l'augmentation en masse/énergie de la biomasse et l'augmentation de la complexité et de la diversité biologique.

Initialement, l'aromorphose fut comprise comme une direction de l'évolution, à l'intérieur de laquelle l'accomplissement biologique s'achève par le progrès morpho-physiologique. Alors que « l'accomplissement biologique » d'un groupe peut être estimé en utilisant des mesures telles que le niveau d'achèvement de la diversité, la biomasse ou la quantité, pour ce qui concerne le « progrès morpho-physiologique », Severtsov assignait ce rôle à l'augmentation énergétique des fonctions vitales. Cependant, une telle approche « énergie centrée » fut plus tard critiquée comme étant trop partielle (Tatarinov, 1976). Schmalhausen (1969) a souligné quant à lui l'importance de ce critère (ou symptôme) d'aromorphose que représente la croissance de la complexité d'organisation, elle-même strictement corrélée avec le développement des conditions d'existence et l'augmentation de leur complexité [...] Parmi les exemples classiques d'aromorphoses biologiques majeures, on peut mentionner l'émergence de la cellule eucaryote<sup>80</sup>, la transition des organismes unicellulaires aux multicellulaires (qui a eu lieu plus d'une fois dans de nombreuses lignées d'organismes eucaryotes), la transition des plantes, des arthropodes et des vertébrés à la vie dans les terres émergées, l'origine des mammifères à partir des thériodontes, l'origine de l'*Homo sapiens*, etc. » [Grinin et autres, 2009:9-10].

Notons dans les deux dernières citations la corrélation étroite établie par l'aromorphose entre le niveau d'énergie vitale, la croissance de la complexité et le niveau de biodiversité des organismes vivants, nous reviendrons à cette dimension première de notre problématique tout à la fin de cette section.

On trouvait par ailleurs dans l'aromorphose les prémisses d'un autre concept fondamental de la biologie évolutionnaire, qui apparaîtra dans le dernier quart du XXe siècle avec la théorie de *l'endosymbiose* (qui explique le progrès évolutionnaire entre les procaryotes et les eucaryotes) initiée par Lynn Margulis (1986)<sup>81</sup>.

Quant à l'ensemble de ces citations, elles regroupent, sauf (à ce stade) sa dimension strictement « thermodynamique », tous les fondamentaux de la *direction de l'évolution* selon Lotka, huit ans avant ses articles séminaux de 1922. En foi de quoi Sewertzoff serait le père de cette théorie auprès de qui Lotka aurait puisé son inspiration.

Notons par ailleurs le début de la dernière citation : « *Initialement, l'aromorphose fut comprise comme une direction de l'évolution...* ».

La précision est importante, car elle nous signale un changement dans la théorie initiale de Sewertzoff. Ce dernier en effet publia ensuite deux autres articles de fond, en 1925 : *Main Directions of Evolutionary Process*, et en 1929 : *Directions of evolution* (Sewertzoff, 1929), dans lesquels il amendait sa théorie initiale de l'aromorphose comme processus

<sup>80</sup> Ce qui ramène l'*endosymbiose*, théorisée par Lynn Margulis (Margulis et autres, 1986) à une *aromorphose*.

<sup>81</sup> Lynn Margulis publia initialement avec Lovelock (représentant moderne du vitalisme) sur *l'hypothèse Gaïa* (Lovelock et Margulis, 1973), avant de revenir aux vraies origines du concept quand elle découvrit *La Biosphère* de Vernadsky, du temps de sa première édition anglaise de 1998. Dans la foulée, elle aurait pu découvrir les travaux de Sewertzoff.

central de « directionnalité » guidant la totalité des évolutions morpho-physiologiques, en intégrant à la suite de ce processus trois autres « directions », que Levit nous décrit comme telles :

(2) La seconde sorte de changements évolutifs progressifs est ce que l'on nomme les *idéoadaptations*. Les idéoadaptations sont des adaptations restreintes qui répondent parfaitement à un certain environnement [...] (3) Sewertzoff nommait la troisième direction de l'évolution biologique progressive *coenogénèse*, un terme formulé par Ernst Haeckel. Sewertzoff écrit : « Nous nommons coenogénèses telles adaptations embryonnaires et larvaires qui se développent dans un organisme durant l'ontogénèse, mais qui sont directement utiles pour l'organisme en développement et plus tard disparaissent [...] (4) *Régression morphophysologique* ou *dégénération générale*, qui ne doit pas être confondue avec *régression biologique*. La dégénération est une simplification, une diminution ou une perte de certaines fonctions et structures attachées, qui peuvent être causées par la transition vers une mode d'existence sessile ou parasitique, et représentent une sorte d'évolution directement opposée à l'aromorphose [Levit et autres, 2004].

Nous n'entrerons pas dans le détail de ces autres chemins évolutifs. Constatons simplement que, si certes ils « brouillaient la piste » de l'aromorphose, ils apparaissent d'évidence bien plutôt comme des branches secondaires la devançant ou la suivant, que des bifurcations de sa *direction centrale*.

Ce qui est plus important, c'est qu'à travers ces publications de 1925 et 1929 (pour celles qui nous ont été accessibles, ne serait-ce que par leur titre) qui modifiaient sa théorie initiale, nous identifions une forme de réaction de Sewertzoff à l'ouvrage publié par Lotka aux **Etats Unis** cette année 1925 : *Elements of physical biology*, qui faisait très explicitement de **la direction de l'évolution** (Lotka, 1925:22-26) le concept central de son ouvrage.

Nous ne pouvons comprendre cette attitude de Sewertzoff<sup>82</sup> qu'en la resituant dans le contexte de la révolution d'octobre et des nouvelles orientations de l'Académie des sciences **soviétique**.

Souvenons nous en effet (paragraphe 1.2.2.) que Marx et Engels avaient repris à leur compte la nouvelle loi universelle de l'entropie et sa *flèche du temps* associée, qui se devait de pénétrer, en opposition au *Vitalisme* antimatérialiste et antimécaniste, tout aussi bien le Libéralisme que le *Matérialisme dialectique*, au risque de *sa plus profonde humiliation* (cf. les mots de Sir Arthur Eddington).

Dans un tel contexte<sup>83</sup>, il ne s'agissait donc surtout pas que les grands savants soviétiques apparaissent comme les pères d'une nouvelle théorie de l'évolution allant *en sens contraire* de celle de Darwin, du second principe, et ce faisant des positions de Marx.

Les autorités soviétiques auraient ainsi usé de « toute leur influence » pour que Sewertzoff reformule sa théorie de l'aromorphose, de telle manière à ce qu'elle soit conforme au sens de l'évolution selon Darwin<sup>84</sup>.

---

<sup>82</sup> Qui aura eu pour conséquence de faire de Lotka le « père » de la nouvelle *direction de l'évolution*, éclipsant aux yeux de l'Occident tant les travaux de Sewertzoff que ceux de son successeur direct Schmalhausen, et dans la foulée tous ceux du courant russe d'une nouvelle « directionnalité ». Ce qui permettra comme nous l'avons vu et le verrons encore aux grands contributeurs de l'écologie anglo-saxonne de s'approprier certains de ses concepts centraux. Le tout ayant pour résultat final, comme nous le verrons, d'éclipser certains fondamentaux de la biogéochimie et de fausser le concept de Biosphère « selon » Vernadsky.

<sup>83</sup> Un contexte d'évolution qui nous fut difficile à décrypter, qui vit la Russie soviétique devenir plus scientifique, mécaniciste et matérialiste que l'Occident, à l'inverse de la Russie impériale, aux tendances aristocratiques reflétant une forme de vitalisme. Contexte dont la vie de Vernadsky témoignera des caractères paradoxaux.

<sup>84</sup> Ils useront comme nous le verrons de cette même influence à l'égard de Vernadsky.

Ceci a permis à Levit et autres (2004) de donner le titre suivant à leur article : *The Integration of Darwinism and Evolutionary Morphology : Alexej Nikolajevich Sewertzoff (1866–1936), and the Developmental Basis of Evolutionary Change*, dont l'objet est justement de montrer comment Sewertzoff a réussi à intégrer sa nouvelle théorie de l'évolution « à l'intérieur » de la théorie darwinienne (à la rendre darwino-compatible).

Les marxistes-léninistes récusaient ainsi une seconde fois<sup>85</sup>, après Engels et Marx, en tordant cette fois la réalité à leur convenance, les apports cruciaux d'une théorie de la nature contredisant les principes de Liebig et leurs fondements !

De ce fait, et ce n'était pas le premier paradoxe de la doctrine matérialiste, Sewertzoff deviendrait paradoxalement à la fois le père et le contradicteur de la nouvelle *direction de l'évolution*.

Cela nous permet de comprendre, au delà de son caractère voisin du vitalisme, pourquoi Sewertzoff rejetait le concept de *nomogénèse* (Levit, 2007a), dit encore *orthogénèse*, formulé par Leo Berg, un ami de Schmalhausen son meilleur disciple, tous deux faisant comme nous l'avons vu partie de l'équipe (de très haut niveau) entourant Vernadsky.

### 2.1.5.3 L. Berg et la *nomogénèse*

Cette année 1922 où Lotka publia ses deux articles fondateurs (nous étudierons - enfin - le second dans la deuxième section de ce chapitre), avait été en Russie très fertile en publications contradictoires à la *flèche du temps*.

La période 1917-1922 correspond en effet aux moments les plus cruciaux de la *guerre civile russe*, qui fut un chaos indescriptible et terriblement violent, où la Tcheka n'avait pas encore pris le contrôle total des territoires, des personnes et de leurs idées, comme elle le fera après 1922, avec sa montée en puissance parallèle à la prise progressive du pouvoir par Staline (1922-1929).

Cette situation permettait à des scientifiques, en opposition soit intérieure, soit extérieure, d'exprimer, si ce n'est affirmer des opinions autonomes, s'il le faut contradictoires à la norme absolue qui bientôt entrera en vigueur.

Ainsi s'expliquerait pourquoi les biologistes évolutionnaires russes, pour une grande part d'anciens aristocrates (ce qui en ferait à priori des russes « blancs » face aux « rouges », mais nous verrons avec Vernadsky que la réalité fut beaucoup plus nuancée), avaient repris les concepts primitifs de Sewertzoff au moment où celui-ci, de part sa haute position à l'Académie des sciences de Moscou, commençait à se trouver en position de devoir les remanier.

Ce contexte révolutionnaire non stabilisé aurait ainsi favorisé le mouvement d'idées propice au courant de pensée russe de la *directionnalité*<sup>86</sup>, alors à contre-courant d'un mouvement de l'histoire particulièrement violent et hasardeux !

Ainsi en est-il de Lev Semionovitch Berg (1876-1950), zoologiste et géographe russe spécialiste de la biologie et de l'écologie des eaux douces. Il avait fait de nombreuses recherches sur les poissons, tant d'un point de vue paléontologique, anatomique

---

<sup>85</sup> Mais il y en a eu probablement bien d'autres que nous ignorons.

<sup>86</sup> Qui très probablement, sur cet aspect fondamental contradictoire au second principe et à sa flèche du temps, est restée souterraine tout au long de la période stalinienne.

qu'embryologique, et avait enseigné au département de géographie de la faculté de physique et de mathématiques de l'université impériale de Saint-Petersbourg. Il est aujourd'hui considéré en Russie comme le fondateur de la limnologie<sup>87</sup>.

Il publia en 1922 son ouvrage, *Nomogenesis or Evolution determined by Law* (Berg, 1922), dans lequel il apporte sa propre contribution à la *direction de l'évolution*.

Citons Verleyen (2007), citant lui-même un article de Jakobson de 1971 :

Selon Darwin, l'évolution est la somme des divergences résultant des variations accidentelles subies par les individus, et qui produisent des changements lents, perpétuels et à peine perceptibles ; il y a une quantité innombrable de variations héréditaires, et elles vont dans toutes les directions. A cette doctrine, la biologie contemporaine, en particulier la russe, oppose de plus en plus la *nomogénèse* : dans une forte mesure, l'évolution est convergente, par suite de lois internes englobant des masses énormes d'individus, sur un vaste territoire, par sauts, par paroxysmes, par mutations brusques ; le nombre des variations héréditaires est limité, et elles vont dans des directions déterminées (Jakobson, 1971) [Verleyen, 2007].

Après quoi Verleyen reprenait la parole :

Jakobson et Troubetzkoy y opposent le caractère ordonné (..) de l'évolution, qui se déroulerait selon des lois internes à l'organisme. Ils reprennent donc l'idée de nomogénèse (ou orthogénèse), défendue par Berg (..) selon laquelle le rôle du hasard et d'autres facteurs externes dans l'évolution (i.c. biologique) est minimal, sinon inexistant [Ibid.].

Notons en passant que Roman Jakobson (1896-1982) fut un linguiste et théoricien littéraire russo-américain, pionnier de l'analyse structurale du langage, qui a eu une influence décisive sur Claude Lévi-Strauss et Roland Barthes, en adaptant l'analyse structurale, au delà de la linguistique, à l'anthropologie et à la théorie littéraire.

Quant à Berg, les passages cités établissent une relation explicite entre une direction déterminée de l'évolution et sa *Nomogénèse*, dans les détails de laquelle nous n'entrerons pas de même, seule son interprétation générale nous intéressant ici.

Comme l'écrivait en 1968 l'auteur de l'avant propos de la traduction anglaise du livre de Berg (1922) cité au-dessus, Théodosius Dobzhansky<sup>88</sup> :

La nomogénèse est l'une des théories autogénétiques de l'évolution, qui postule que l'évolution est un déploiement de rudiments ou de potentialités préexistantes plutôt qu'une série de réponses adaptatives des espèces vivantes à leur environnement. Il y a eu d'autres théories autogénétiques avant et après celle de Berg, et beaucoup d'entre elles ont postulé des agencements vitalistes ou carrément surnaturels qui prétendent pousser et guident l'évolution. Berg a fait une vaillante, quoique partiellement fructueuse, tentative pour éviter les pièges du vitalisme. La Nomogénèse est un développement causé par « des agencements intrinsèques et constitutifs prévus dans la structure chimique du protoplasme qui contraignent l'organisme à varier dans une direction déterminée » [Berg, 1922, dans sa traduction anglaise de 1968].

Après quoi Dobzhansky précisait que l'analogie entre le développement individuel (ontogénèse) et le développement évolutionnaire (phylogénèse) forme la pierre angulaire

<sup>87</sup> Quand on dit aux Etats Unis que c'est Hutchinson ! (mais nous n'avons pas d'opinion constituée à ce sujet).

<sup>88</sup> C'est lui qui avait favorisée son édition (Levit, 2007). Nous avons déjà vu le rôle qu'il avait joué comme assistant de Vernadsky et Schmalhausen. Il transmettait ainsi à ce moment aux Etats Unis l'héritage de Berg, comme il avait déjà transmis celui de Sewertzoff et Schmalhausen. Quant à Vernadsky, son héritage sera primitivement introduit aux Etats Unis par son fils, George Vernadsky, qui y avait émigré ; quand il fera une première traduction anglaise partielle, en 1944, d'un article de son père, *Problèmes de Biogéochimie II* (Vernadsky, 1938), qui sera communiqué la même année à l'Académie des Arts et des Sciences du Connecticut par Hutchinson (1944).

de la théorie de Berg, avec des lois (nomos) de développement organique (genèse) qui seraient identiques pour les deux, d'où une « nomogénèse » s'appliquant à l'une et l'autre.

Ce qui suppose que le développement évolutionnaire suivrait une direction, une loi de croissance répondant à une finalité<sup>89</sup> qui élargirait tant au monde animal qu'à l'*Ecosphère*<sup>90</sup> en entier la directionalité des *successions* végétales de Clements vers le *climax*.

Berg jouerait ainsi vis à vis de Vernadsky, Sewertzoff étant mis à part, un rôle similaire à celui de Clements vis à vis de Lotka, mais à une échelle supérieure du vivant, quand ce dernier interpréta en termes énergétiques ses concepts de *succession* et *stabilisation*.

Sachant cependant qu'il n'est pas le seul à jouer un tel rôle. Là où Clements, ou Lotka, formulaient en Amérique leurs concepts et hypothèses de manière relativement isolée et individualiste, les chercheurs russes semblent avoir su alors se coordonner et se partager la tâche pour déployer des propositions qui toutes ensemble constitueront la grande synthèse russe des sciences de la vie.

Nous présenterons ainsi en quelques mots les apports d'un autre membre de ce groupe de réflexion, Vladimir Sukachov, ceci quand nous réserverons à la seconde section de ce chapitre les apports de Schmalhausen, ami du précédent et membre du même groupe (Olson et autres, 2010).

#### 2.1.5.4 V. Sukachov et les *biogéocénoses*

Vladimir Sukachov (1880-1967) fut une des figures les plus importantes de la botanique russe du XXe siècle. En développant le concept de *zone naturelle* avancé par Vassily Dokouchaev (1846-1903), père de la pédologie et mentor de Vernadsky, il a émis l'idée d'une *autorégulation* du système global constitué par la matière vivante « et » son environnement, pour formuler lui-même un nouveau concept, la *biogéocénose*.

La biogéocénose est l'équivalent russe de l'*écosystème*, mais avec quelques différences essentielles. Elle décrit une *biocénose* en incluant son environnement inerte ainsi que tous les facteurs et relations biotiques qu'ils entretiennent, pour en faire un système autorégulé, relativement *isolé* et *stabilisé*, occupant une zone clairement détectable<sup>91</sup>.

Schmalhausen voyait dans la biogéocénose le facteur central de *stabilisation*<sup>92</sup> dans l'évolution ; ce qui d'évidence complétait les apports de Clements, et qui a pu faire dire à Schmalhausen que :

On peut dans ce cas révéler l'interconnexion intime entre le régulateur (la biogéocénose) et l'objet à réguler (la population) [Levit, 2007a].

En incluant le *socle géologique* constitutif de l'environnement inerte des organismes vivants, la biogéocénose inclut à la fois l'environnement biotique et abiotique fonctionnant comme un système interconnecté ; elle devient dès lors l'objet d'étude privilégié de la biogéochimie, dont le caractère transversal aux disciplines d'analyse

<sup>89</sup> Nous n'utiliserons pas le terme de « téléonomie », comme nous l'avons vu trop suspect de *Vitalisme*.

<sup>90</sup> Nous en proposerons une première définition dans un prochain paragraphe.

<sup>91</sup> Gubanov et Degermendzhy (2008), de l'école russe moderne de biogéochimie, ont approfondi l'analyse des relations biotiques d'une *biogéocénose* pour préciser la dynamique évolutionnaire de transformation la menant d'un système *ouvert* (échangeant énergie et matière avec l'environnement) à un système relativement *clos*, autosuffisant et autorégulé. Nous y reviendrons.

<sup>92</sup> Qui fondait l'origine « naturelle » d'un concept, la « stabilité », aujourd'hui central en chimie et thermodynamique.

spécialisées est indissociable de la Biosphère, dont elle forme *l'unité structurale élémentaire* (Olson et autres, 2010).

Levit pourra alors définir en toute logique la Biosphère comme la *somme de toutes les biogéocénoses*<sup>93</sup> (Levit, 2007a).

Ce qui de Sukachov nous mène à Vernadsky, élevant avec lui notre recherche à une toute nouvelle dimension de la pensée scientifique.

### 2.1.6 L'exception de Vernadsky

Nous bouclerons dans ce paragraphe notre quête des continuateurs de Podolinsky, sur les fondements biogéochimiques et thermodynamiques constitutifs d'une *écologie globale de la Biosphère*, qui forme pour le XXI<sup>e</sup> siècle, celui des grands défis écologiques, un des héritages les plus essentiels du XX<sup>e</sup> siècle.

Il constitua en son temps pour les sciences de la nature une véritable révolution, mais une révolution complètement invisible !

#### 2.1.6.1 Une révolution devance l'autre<sup>94</sup>

Ukrainien, fils de la haute noblesse terrienne (son père possédait un domaine de 600 hectares, qu'il lui légua, mais qui lui sera confisqué après 1917), Wladimir Vernadsky (1863-1945) était comme tel un des étudiants privilégiés de l'Université de St Pétersbourg où il fut successivement le disciple de Mendeleïev (tableau périodique des éléments) et de Dokouchaev (fondateur de la pédologie).

C'est au cours de ces études qu'il rencontra en 1882 les frères Oldenbourg, lors d'une grande manifestation étudiante qui tourna à la révolte et eut pour l'époque un caractère, qui se serait inspiré de la Commune, et qui nous fait penser au « mai 68 » français. Eux aussi fils d'aristocrates, les deux frères venaient de fonder, dans le cadre de l'Université, le « cercle Oldenbourg » ; il fut la traduction directe, au sein du mouvement étudiant, des positionnements sociaux-politiques nouveaux de Tolstoï suite à la crise de remise en cause profonde qu'il traversa à partir de 1877, et qu'il exprima notamment dans son roman de 1899, *Résurrection*, pour lequel il sera excommunié en 1901.

Ce cercle tiendra pendant des années, à contrario des étudiants marxistes, qui pour certains organisèrent en 1887 l'attentat raté contre Alexandre III (le chef déclaré de cette tentative d'assassinat était le frère de Lénine, Alexandre Oulianov, qui fut exécuté), un rôle très important dans les fondements d'une vision « communaliste », pacifiste et non violente, quasi « écologique » de la révolution russe. Pacifisme et non violence que les membres du cercle héritèrent de Tolstoï, qui fut en la matière le Professeur de Gandhi.

Et c'est à l'exemple de Tolstoï que les frères Oldenbourg, Vernadsky et leurs amis du cercle, bientôt très nombreux, étudièrent les œuvres d'Alexandre Ivanovitch Herzen

---

<sup>93</sup> Définition pas vraiment fautive mais un peu précipitée, à laquelle nous apporterons dans le paragraphe suivant consacré à *L'exception de Vernadsky* un amendement consistant à bien différencier *Biosphère* et *Ecosphère* ; ce après quoi c'est l'Ecosphère, incluse « dans » la Biosphère, que nous pourrions définir comme la somme de toutes les biogéocénoses.

<sup>94</sup> Nos sources de ce paragraphe sont tirées notamment de Wikipédia pour le *parti KD*, et pour le reste proviennent principalement de la biographie très complète de Vernadsky publiée par Bayles (1990), complétée par Deléage (2002).

(1812-1870), ami de Proudhon<sup>95</sup> et des *socialistes utopiques* français, pour tenter de les mettre en pratique. Ceci au sein de communautés qu'ils rêvaient comme autant de petits états souverains, libérés de toute tutelle et orientés sur la quête de la liberté de la personne et l'auto-développement de la personnalité<sup>96</sup>.

Ils vont ainsi promouvoir dans le monde étudiant russe de cette époque, une forme d'ascétisme social, libertaire et anti-impérialiste (dans tous les sens du terme) dont les trois commandements principaux, tout à fait précurseurs de la « décroissance » actuelle, furent : Travailler et produire le « mieux » possible - Consommer le moins possible - Traiter les besoins des autres comme s'ils étaient les nôtres.

Vernadsky prenant dans le cercle Oldenbourg un rôle prépondérant, il deviendra bientôt le plus à même d'approcher Tolstoï. Après qu'il soit devenu, en 1886, Président du *Conseil uni des organisations étudiantes de Russie*, il le rencontrera à plusieurs reprises pour avoir avec lui des discussions approfondies concernant l'orientation de la jeunesse russe tout autant que la sienne (Bailes, 1990).

En 1893, il a alors 30 ans et Tolstoï 65, il notera sur son journal :

Je pense que l'enseignement de Tolstoï est beaucoup plus profond que je l'ai premièrement pensé. Cette profondeur consiste (selon lui) : 1- La base de la vie est la recherche de la vérité. 2 - La tâche réelle est de dire cette vérité sans aucune restriction. Je pense que la seconde est très importante et que le refus de toute hypocrisie et de tout pharisaïsme constitue la force de base de cet enseignement, à partir du moment où, comme résultat, la personnalité devient plus forte et reçoit la force sociale [Bailes, 1990:83].

C'est ainsi que, selon Bailes :

Vernadsky en vint à voir Tolstoï comme un accumulateur majeur de l'« énergie » de la conscience et de la raison humaines. Et c'est le progrès de la conscience et de la raison, à travers la science et une haute culture en général, que Vernadsky en vint à voir au début des années 1890 comme son objectif personnel. Ce qui l'a poussé inexorablement à investir ses énergies dans la recherche scientifique, l'éducation et la lutte pour un système politique qui réaliserait ces objectifs [Ibid.].

Notons bien cette intention de coupler la recherche scientifique, l'éducation et la lutte politique pour en réaliser les objectifs. Car il accomplira cette intention « globale » avec une volonté farouche qui le mènera à un niveau d'implication sociale rarement atteint dans l'histoire occidentale.

C'est ainsi sur de telles bases que Vernadsky et ses amis du cercle militaient en faveur de l'instauration d'une démocratie en Russie, et qu'ils fondèrent quelques années plus tard à Moscou, en octobre 1905, avec l'historien Pavel Milioukov et un autre ami de Vernadsky, A. Kornilov, le *Parti constitutionnel démocratique* (dont les membres étaient appelés *cadets*, d'où l'abréviation *Parti KD*).

C'était à l'apogée de la première révolution russe de 1905, quand l'empereur, Nicolas II, fut contraint de signer le *Manifeste d'octobre* octroyant des libertés civiques fondamentales. Les cadets réclamaient pour leur part le suffrage universel (y compris le suffrage féminin), l'éducation des anciens serfs, l'accès à l'université pour les femmes à l'égal des hommes, ..., et une assemblée constituante qui permettrait de déterminer la forme de gouvernement de la Russie.

---

<sup>95</sup> Herzen fut le Père du socialisme russe et, dit-on, de l'émancipation des serfs ; il s'exilera à Paris en 1847 et deviendra collaborateur de Proudhon.

<sup>96</sup> Cf. le film très bien documenté : *Tolstoï, le dernier automne*.

Mais de telles revendications éloignaient par trop les cadets des partis de gouvernement. Après maintes évolutions, ils modérèrent vers 1908 leurs positions anti impérialistes pour se déclarer favorables à l'établissement d'une Monarchie constitutionnelle, à l'exemple de l'Angleterre. Votant pour dénoncer la violence révolutionnaire, ne cherchant plus l'affrontement avec le gouvernement et s'appliquant à influencer la législation dans la mesure du possible, ils augmentèrent leur nombre de députés à la *Douma*, et pénétrèrent progressivement le gouvernement.

Au cours de la révolution de Février 1917, après *le compromis du 2 mars 1917*, qui vit l'abdication de Nicolas II et la mise en place d'un double pouvoir (la Douma et les Soviets), les cadets formeront le noyau du nouveau gouvernement provisoire avec cinq portefeuilles.

Ces journées de mars 1917 furent exceptionnelles. Lisons ce qu'en dit Nicolas Werth, historien chercheur au CNRS, dans un document Internet :

En ces jours euphoriques du printemps 1917, les nouveaux gouvernants rêvent de faire de la Russie « le pays le plus libre du monde ». En quelques semaines, le gouvernement provisoire prend un train de mesures spectaculaires: libertés fondamentales, suffrage universel, amnistie générale, abolition de la peine de mort, suppression de toute discrimination de caste, de race ou de religion, reconnaissance du droit de la Pologne et de la Finlande à l'autodétermination, promesse d'autonomie pour les minorités nationales [...] Dans ce climat d'euphorie libératrice, la politique envahit tout. C'est le triomphe du meeting permanent, le « mitingovanié », véritable fête de libération. «*On ne pouvait pas acheter un paquet de cigarettes, prendre un fiacre, écrire dans ses souvenirs Constantin Paoustovski, sans être entraîné dans une discussion politique. Les serveurs de café et les domestiques vous demandaient des conseils sur la manière dont il faudrait voter. Tous les murs de la ville étaient couverts d'affiches annonçant un meeting, un congrès, une réunion, un programme électoral, et pas seulement en russe, mais en polonais, en lituanien, en yiddish...* » [Werth, 2007].

Dans ce nouveau gouvernement, un des dirigeants des cadets, le prince Lvov, deviendra Premier ministre et Pavel Milioukov ministre des Affaires étrangères (tout en dirigeant en sous main le gouvernement). Quant à Sergueï Oldenburg, l'ami de Vernadsky, il deviendra ministre de l'Éducation et prendra ce dernier comme assistant chargé de très nombreuses commissions scientifiques, à l'exemple de la commission des ressources naturelles<sup>97</sup> et de la commission de réforme de l'agriculture, chargée de développer la productivité agricole de la Russie.

Mais sa plus grande responsabilité fut alors d'être ministre assistant, responsable de toutes les universités et institutions scientifiques de Russie, en charge de la réforme des sciences et des universités, en vue notamment de leur ouverture à une éducation « populaire » non élitiste (Bailes, 1990:141). C'est à ce moment qu'il fonda l'Académie des sciences d'Ukraine (à Kiev) et modifia en profondeur celle de Russie.

Mais l'euphorie sera très brève ! Les cadets deviendront très rapidement un handicap pour leurs partenaires (une coalition socialiste) et un paratonnerre pour la propagande bolchévique. Avec la prise de pouvoir (bolchévique) des soviets du 25 octobre 1917, plusieurs ministres du gouvernement provisoire seront emprisonnés, la presse des cadets sera interdite et leur parti supprimé. Oldenburg ira voir Lénine pour se plaindre de cette arrestation des ministres, sans succès !

---

<sup>97</sup> A partir de laquelle il créera l'Institut Russe du Radium, à la suite des travaux de Pierre et Marie Curie, dont il fut relativement proche, et qu'il suivait depuis des années.

La révolution était trahie, après et avant bien d'autres !

Après quoi la plupart des chefs cadets, dont Milioukov, seront contraints à émigrer, principalement à Paris, d'où ils continueront à publier des journaux du parti jusqu'à la seconde Guerre mondiale.

Quant à Vernadsky, c'est paradoxalement au cours de ces journées d'octobre 1917, alors qu'il était réfugié dans sa datcha des environs de Moscou, que, reprenant la notion originelle de Biosphère introduite par une « généralisation empirique » du géologue viennois E. Suess en 1875, il avait développé ses concepts fondateurs (Vernadsky, 1929).

Suite à ces journées, devenu un proscrit, son périple sera très mouvementé. D'abord réfugié à Kiev (car d'origine ukrainienne), il verra un de ses assistants assassiné par la *Tcheka*, lui-même étant activement recherché (durant la guerre civile entre Rouges et Blancs, Kiev changera 14 fois de camp entre 1917 et 1922). Il ira ensuite en Crimée, se cachera dans la campagne ukrainienne, reviendra à Moscou sous la protection de hautes personnalités amies, puis ira à Petrograd et finalement émigrera à Paris pour, à priori, comme ses amis cadets, s'y installer définitivement.

C'est ainsi que ces années 1921-22 où Lotka publiait ses articles aux USA, Vernadsky était réfugié politique à Paris<sup>98</sup>, où il exposait parallèlement à ce dernier les premiers fondements de la Biosphère et de sa nouvelle discipline transversale d'étude de la nature, la *Biogéochimie*, lors d'un long séminaire (1921-22) à l'Université de Paris-Sorbonne, *la plus ancienne d'Europe*<sup>99</sup> (Vernadsky, 1924 ; Bailes, 1990 ; Deléage, 2002).

Ceci pour dire que cette époque charnière très mouvementée, dans le mouvement général des idées et des personnes qu'elle générerait de l'Est à l'Ouest, et de part et d'autre de l'Atlantique, fut propice, et notamment l'année 1922 - nous avons vu que Sewertzoff et Berg publièrent leurs travaux séminaux cette même année - à l'expression d'une nouvelle *direction de l'évolution* contraire à la *flèche du temps* !<sup>100</sup>

Vernadsky regroupera les conférences de son séminaire dans *La Géochimie* (1924), un ouvrage publié « en France et en français »<sup>101</sup>. Puis présentera par la suite une forme plus accomplie de ses concepts dans *La Biosphère*, ouvrage publié en Urss en 1926 et traduit en français dès 1929.

Toutes choses qui, dès cette époque et à cet endroit, offraient toutes raisons aux concepts élaborés autour de la Biosphère d'acquiescer une primauté universelle.

Mais ce fut pourtant loin d'être le cas !

<sup>98</sup> Il y séjourna alors de juillet 1921 à novembre 1925.

<sup>99</sup> Nous laissons entendre par là que cette Université pouvait « alors » être encore considérée comme une des (sinon « la ») plus prestigieuses du monde occidental, qui n'avait pas encore achevé, à la fin de la première guerre mondiale, les bouleversements complets qu'apportèrent la seconde guerre mondiale et ses suites. Comme l'écrivait Vernadsky dans sa préface de 1923 à *La Géochimie* « *La possibilité de faire des conférences à la vieille Sorbonne m'a été d'autant plus chère, que je sens le lien indissoluble de l'activité scientifique multiséculaire de l'Université de Paris avec toute la vie scientifique de l'humanité* » (Vernadsky, 1924:II).

<sup>100</sup> Mais en même temps qu'elle s'orientait malheureusement sur une autre énergétique, de nature géologique cette fois, la radioactivité, qui mènera directement à la réalisation de la bombe nucléaire, ce dont Vernadsky d'ailleurs, comme nous allons le voir, ne sera lui-même pas exempt !

<sup>101</sup> Vernadsky (dénommé par les Russes *Le dernier humaniste*) parlait couramment le Français, et comme beaucoup des humanistes russes, il admirait profondément la France en tant que patrie des Droits de l'Homme, à l'exemple de Tolstoï (quoique ce dernier révisa fortement son opinion dans *Guerre et Paix*).

Tout comme son collègue (scientifique) Schmalhausen avait « transmis », via Dobzhansky, l'héritage de la synthèse évolutionnaire russe aux Etats Unis, nous considérons pour notre part que Vernadsky manifestait alors, avec ses conférences de la Sorbonne<sup>102</sup> et leur publication, sa ferme intention de transmettre en personne à sa nouvelle patrie d'accueil, *l'héritage de la Biogéochimie et de la Biosphère*.

Notamment en ces moments les plus cruciaux de la guerre civile qui avaient généré depuis 1917 un chaos indescriptible, et où l'année 1922 représenta un tournant à partir duquel la Tcheka monta jusqu'au pouvoir ultime dans le sillage de Staline (1922-1929).

La France représentait donc à ce moment très particulier « le » territoire par excellence à partir duquel, en même temps que ses amis cadets comme lui réfugiés à Paris, Vernadsky pouvait affirmer ses opinions autonomes (scientifiques dans le cas de la Sorbonne), contradictoires à la norme de pensée marxiste et matérialiste en voie de s'imposer à toute la Russie soviétique.

Et c'est donc à ce moment qu'il demanda (en toute logique) aux autorités françaises l'autorisation et les moyens de créer, au Muséum d'histoire naturelle de Paris, un grand laboratoire d'étude des cycles biogéochimiques (Deléage, 2002:11).

A quelles autorités ? Nous ne le savons pas exactement.

Nous savons par contre qu'il avait à l'Académie des sciences un ami de longue date, Alfred Lacroix, professeur au Muséum, qui l'aura très probablement aidé dans sa démarche.

Tout comme nous savons qu'il était relativement proche de Marie Curie, d'origine polonaise, auprès de laquelle, au long des quatre années de sa présence à Paris, il se consacra à l'étude des minéraux radioactifs.

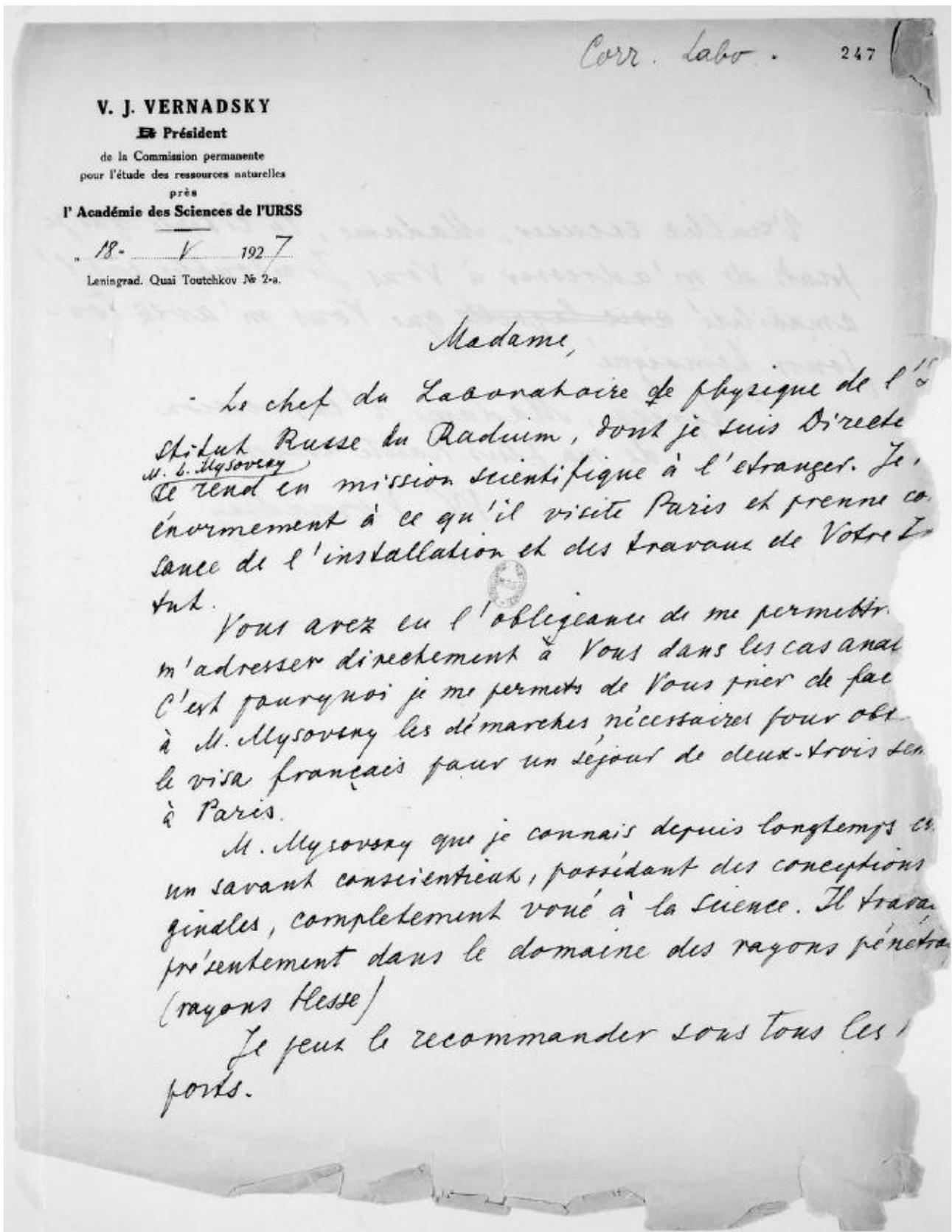
Ce dont témoigne, en même temps que de son très bon français, la lettre suivante, tirée du fond d'archives de la Bibliothèque Nationale (BnF)<sup>103</sup>.

---

<sup>102</sup> P. Teilhard de Chardin y assista, et tiendra de là son concept de Biosphère, et peut être de « Noosphère » (la chose est encore débattue en ces temps d'une « Anthropocène » émergente).

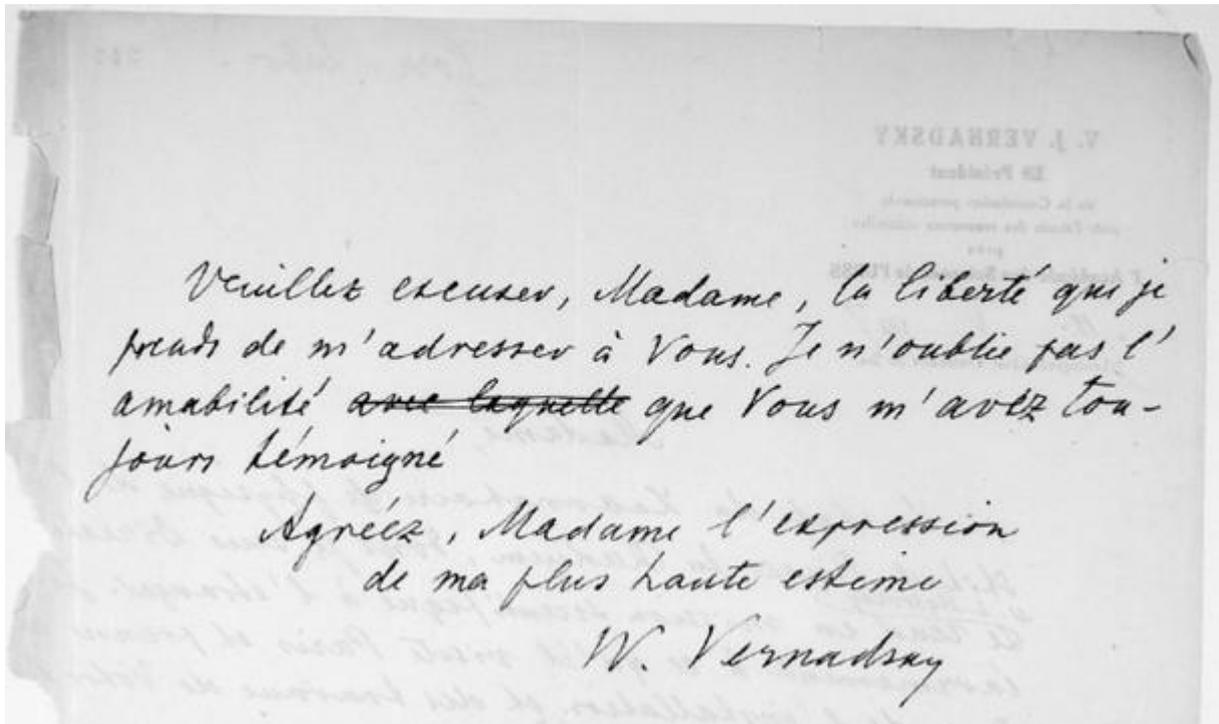
<sup>103</sup> Dès son retour fin 1925 en Russie, devenue entretemps l'URSS, Vernadsky était devenu Directeur de l'*Institut Russe du Radium* qu'il avait créé en 1917.

Figure 7.1 : Lettre de W. Vernadsky à Marie Curie, 1927, recto.



Source : BnF, Gallica, Département des manuscrits, côte NAF 18365-18517

Figure 7.2 : Lettre de W. Vernadsky à Marie Curie, 1927, verso.



Source : BnF, Gallica, Département des manuscrits, côte NAF 18365-18517

Lettre qui représente au passage un témoignage historique très significatif, quand nous savons aujourd'hui que c'est à partir de ce même Institut Russe du Radium créé en imitation de celui de M. Curie, que Vernadsky développera à partir des années 30 une (radio !) activité insatiable (le premier cyclotron russe, le premier laboratoire russe de production d'eau lourde, le premier centre russe de recherche sur les isotopes, ...) qui aboutira, à partir de 1942-43 au développement de la technologie nucléaire soviétique (Bailes, 1990:160-178) !

Débuter comme un chef quasi « soixante-huitard » des étudiants, devenir disciple non-violent de Tolstoï à la suite de Gandhi, participer au renversement du Tsar et à la révolution, être Secrétaire d'Etat à l'éducation et à la science de l'unique gouvernement russe démocrate, fonder l'écologie globale, fuir la Tcheka puis finir père de l'industrie nucléaire et de la science soviétique (et ukrainienne !), voilà un destin pour le moins « très » hors du commun dont les paradoxes « vertigineux »<sup>104</sup> demandent un minimum d'explication.

Pour s'en faire une idée approfondie, nous ne pouvons que recommander l'excellente biographie - en anglais - de Bailes (1990)<sup>105</sup>.

Pour autant, nous pensons détenir une partie au moins de l'explication.

<sup>104</sup> Dans une communication personnelle, Jacques Grinevald, expert de Vernadsky (1997, 2002, 2013), nous disait sans pouvoir pour autant l'affirmer, que Vernadsky serait mort fou !

<sup>105</sup> Via Amazon, une livraison en France demande environ deux semaines, voir moins.

Si nous ne savons pas en effet quelle autorité française Vernadsky consulta pour créer un laboratoire de biogéochimie parisien, ce que nous savons par contre, c'est que cette autorisation lui fut strictement refusée (Bailes, 1990).

Pour quelle raison exacte ? Du fait de ses implications politiques, ou parce qu'il fut un moment suspecté de *vitalisme* (cf. paragraphe 2.1.5.1.), ou parce qu'il faisait de l'ombre à quelqu'un ? Pas de réponse !

C'était en tous cas au moment où Vernadsky n'avait plus aucune source de subsistance pour lui et sa famille ; officiellement toujours académicien, les Soviétiques avaient supprimé son salaire en 1921, et il avait été jusqu'en 1925 tantôt aidé par ses compatriotes réfugiés, tantôt par la Sorbonne, et tantôt par le laboratoire de Marie Curie.

Ses amis réfugiés en France ainsi que sa femme voulaient absolument qu'il reste à Paris, alors même que ses collègues restés en Russie, dont Sergueï Oldenbourg, qui avait pu maintenir quelques hautes responsabilités<sup>106</sup>, exerçaient sur lui d'incessantes pressions pour rentrer au pays, devenu entretemps URSS, et participer à sa reconstruction.

Ceci à la demande des Soviétiques (Bailes, 1990 :161), et donc forcément de Staline, qui dès l'année 1924, après la mort de Lénine et le bannissement de Trotski, outre les Soviétiques, maîtrisa un nombre considérable des leviers du pouvoir ; Soviétiques qui lui promettaient une chaire à l'Académie des sciences, ainsi que la liberté et les moyens financiers de poursuivre sa ligne de recherche (Ibid.).

Staline était ainsi prêt à lui accorder une forme d'« immunité diplomatique sous conditions » (de bâtir le nouvel empire scientifique et technologique russe, ce qu'il fera effectivement !).

Bailes nous raconte que Vernadsky fit d'énormes efforts à ce moment pour trouver les moyens de résister à cette pression. Devant son insuccès, lui qui était, il en avait vécu au premier chef ses aspects, absolument contre le bolchévisme, commença à se raconter des histoires ; comme par exemple cette lettre de 1925 à Fedor Rodichev où il exprimait sa vue selon laquelle « l'Utopie du communisme », qui était une idéologie périssante, n'était pas dangereuse (Ibid.).

Mais il y avait aussi un autre aspect de ses convictions qui joua sur son ambivalence de l'époque. A la suite de Tolstoï, excommunié en 1901, il était contre le « pouvoir » religieux de l'église orthodoxe, qui selon lui avait joué un rôle crucial dans l'archaïsme de la Russie impériale. Et il pensait que la science, matérialiste et historiciste, comme l'était le marxisme, serait à même de définir de nouvelles perspectives d'évolution de l'humanité.

A l'exemple du concept de *Noosphère* qu'il avait développé ; avant ?, en participation avec ?, ou à la suite de Teilhard de Chardin ?, on ne sait pas très bien, sachant qu'il reste lui-même ambigu à ce sujet dans un article de 1944 écrit à propos de *La Biosphère et la Noosphère* (Vernadsky, 1944).

Et jusqu'à sa mort, en 1945, il essaiera comme cela, en se mettant probablement un bandeau sur les yeux face aux péripéties du Staliniisme qui se déroulaient devant lui, de se

---

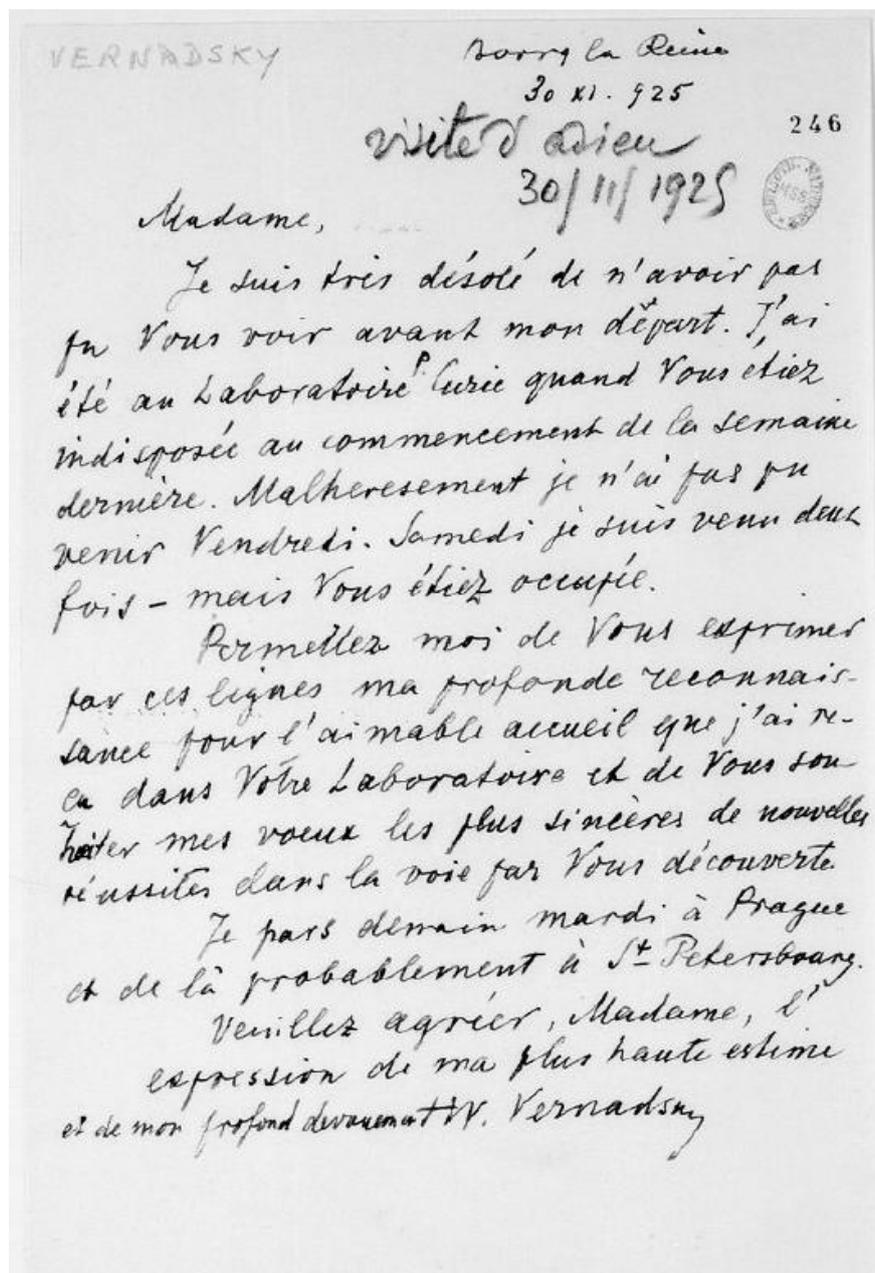
<sup>106</sup> Les choses en histoire ne sont jamais ni simples ni limpides. Une frange radicale des bolchéviques voulait en 1917 abolir l'Académie des sciences (Bailes, 1990:148), et Oldenbourg et Vernadsky réussirent à infléchir leur position (ou à monter une frange contre l'autre ?) et sauver ainsi la science russe et son académie. Ce qui fut une raison minimale pour qu'Oldenbourg garde le poste de Secrétaire général de cette Académie et ne soit pas pourchassé par les bolchéviques. Mais ses (ex) amis cadets l'accusèrent depuis Paris d'avoir pactisé avec l'Antéchrist (Bailes, 1990.:160).

convaincre lui-même que l'humanité n'avait pas encore tout dit d'une « nouvelle physique » (Vernadsky, 1930) qui changerait sa face, comme par exemple cette nouvelle « autotrophie » à laquelle elle pourrait accéder (Vernadsky, 1943).

C'est donc bien au final le refus des autorités françaises qui fut la « goutte » qui fit déborder le vase, et fit basculer son idéalisme ambivalent dans le camp d'une nouvelle construction de la science soviétique.

Il accepta les conditions de Staline et quitta Paris en novembre 1925 sans avoir pu faire ses adieux à Marie Curie :

Figure 8 : Lettre d'adieux de W. Vernadsky à Marie Curie, 1925



Source : BnF, Gallica, Département des manuscrits, côte NAF 18365-18517

Que devint Vernadsky en URSS ? Il sera bientôt « interdit de publication », et ne devra qu'à son immense notoriété, ainsi qu'aux services de premier plan qu'il rendra à ce régime qu'il détestait, de ne pas être envoyé au Goulag, ou plus simplement passé par les armes. Comme le dit Grenier :

Aux pires moments des grandes purges staliniennes, il mène la résistance contre la « normalisation prolétarienne » de l'Académie, défend ses collaborateurs arrêtés et critique les échecs du régime, notamment en matière de famine. Il meurt à Moscou en 1945. Sa vie durant, il a défendu et promu la science, mise au service du développement de l'humanité. Intouchable de son vivant, il est proscrit après sa mort. La publication de ses œuvres est interdite. Jusqu'à la mort de Staline, le simple fait de prononcer son nom est devenu dangereux. Cela explique pourquoi certaines des œuvres de sa vieillesse commencent tout juste à être publiées en Russie [Grenier, 2000].

Et Bailes nous confirme qu'il fut en URSS une des très rares personnes, tout au long de la montée en puissance et de la domination de Staline, à oser clamer publiquement le fond de sa pensée et sa réprobation du régime. Comme le lui avait enseigné Tolstoï, Vernadsky resta ainsi fidèle - tant que faire il aura pu - à la tâche de vérité qu'il s'était imposée.

Ceci dans le même temps qu'il participa, au tout premier niveau, jusqu'à sa mort (1945), à la construction du système industriel et nucléaire soviétique !

Qui d'entre nous, dans de telles circonstances, ne serait pas devenu totalement fou !

### 2.1.6.2 La révolution sous silence !

Examinons un moment les répercussions plus que considérables qu'eut le refus d'un obscur gratte papier de l'administration française des années 20 d'accepter la demande de Vernadsky.

Les « si » ne refont pas le monde, nous le savons bien.

Mais pourtant, « si » nous regardons tout cela depuis 2015, et constatons que la biogéochimie n'a fait en France que de très faibles progrès, et encore à l'instigation des biogéochimistes américains héritiers de Hutchinson (comme par exemple Falkowski et autres (2008a, b, 2009)), nous pouvons en déduire que la France a pour le moins pris quatre-vingt-dix-ans de retard sur une pratique approfondie et globale des disciplines du vivant susceptible de transformer complètement notre regard sur la Nature !

Quand nous apprenons par exemple que Vernadsky constatait dès 1922 dans son séminaire de la Sorbonne, chiffres à l'appui, que l'homme dérangeait avec ses émissions de CO<sub>2</sub> l'équilibre naturel de l'atmosphère établi depuis des centaines de millions d'années (Vernadsky, 1924 :302-312), nous pouvons facilement imaginer, « si » ce laboratoire avait été monté, l'autorité mondiale que la sphère scientifique française aurait acquise **en décembre 2015** dans son expertise vis à vis du *changement climatique*, et plus encore l'exemplarité au regard des alternatives en ce domaine que la France aurait probablement développées depuis des décennies.

Mais il y a plus encore.

Nonobstant le développement de l'industrie nucléaire soviétique, dont nous ne saurions débattre du fait si, dans l'équilibre des forces de la guerre froide, cela constitua ou non une mauvaise chose, le retour de Vernadsky en Russie, suivi de l'interdiction stalinienne de publier ses travaux, fera notamment que la première publication anglaise de *La Biosphère* n'aura lieu qu'en 1998, soit 70 ans après sa publication française.

C'est ainsi qu'un couvercle de silence en acier trempé aura été mis sur la *révolution vernadskienne* (Grinevald, 2013), pendant soixante dix ans !

La révolution de Vernadsky aura été ainsi réduite au silence, tout aussi bien par la révolution bolchévique ... que par l'inconséquence d'une administration française de l'entre deux guerres, qui se préparait à en faire de biens plus belles, quelques années plus tard !

C'est par de tels comportements, dans des moments aussi « essentiels », que la primauté scientifique du « vieux monde » disparaîtra progressivement tout au long du XXe siècle. Car cela permettra dans le même temps, comme nous l'avons survolé avec l'exemple d'une énergétique de l'évolution, à la science de la Nouvelle Angleterre de récupérer et s'attribuer nombre de faits scientifiques acquis de la vieille Europe.

Cette dernière aura connu tous les bouleversements qui viendront se cumuler, depuis l'arrivée au pouvoir de Staline et Hitler (et Pétain !), jusqu'à la seconde guerre mondiale, la guerre froide, etc., pour finalement permettre la primauté du nouveau monde sur « le monde d'après ».

Ce dont Lotka, Hutchinson, Lovelock, ..., auront d'évidence profité !

Cela n'aurait pas du tout été en soi un mal, « si », pour ce qui concerne notre propos, la *Biosphère* et la *biogéochimie*, qui « accomplissaient » dans toute sa profondeur l'idée d'une autre direction de l'évolution, au moment où Lotka seulement l'« exprimait » (tout comme Podolinsky l'avait fait avant lui), n'avaient pas été entretemps éclipsées pendant cinquante ans au moins.

Et « si » tout ce temps, et même après la Péréstroïka, et même après sa publication américaine, l'aspect le plus fondamental de la « théorie-cadre » de *La Biosphère* et de la *révolution vernadskienne*, au regard notamment de la *flèche du temps*, n'était resté jusqu'à nos jours enfermé dans le silence par le couvercle de la marmite.

Il s'agit de « l'exception de Vernadsky », c'est à dire la contradiction formelle, constituée par la Biosphère, que Vernadsky opposa à la *flèche du temps* et à la *conclusion* de Clausius concernant *les deux sens* des transformations qui s'opèrent dans l'Univers.

Que nous étudierons au long des deux paragraphes suivants.

Et qui ne fut, à notre connaissance, jamais reprise, jamais soulignée, jamais évoquée, ni dans la Nouvelle Angleterre, ni dans le pays auquel Vernadsky avait confié son héritage.

Cette contradiction formelle nous engage à passer maintenant du côté « historico-politique » de l'histoire invraisemblable que fut celle de Vernadsky, à son côté « historico-scientifique ».

### **2.1.6.3 Une contradiction formelle de la *Flèche du temps***

Entre 1921 et 1924, dans les conditions particulièrement exceptionnelles du contexte dans lequel il se trouvait, Vernadsky en avait profité, dans son séminaire de la Sorbonne, puis dans les deux livres qui lui feront suite, pour exprimer, nous dirons mieux « transmettre », le *fond de sa pensée* quand à la matière nouvelle sur laquelle il travaillait.

C'était le résultat ultime de la carrière politique et scientifique hors normes qu'il avait poursuivie, et probablement pensait-il qu'il n'aurait plus l'occasion de le faire, ce en quoi il ne se trompait guère.

Il nous le « confiait », en espérant, avant de se sacrifier pour une mère-patrie devenue sourde dont il avait déjà défendu les intérêts et, malgré tout, les défendrait encore « au delà » du bolchévisme, que nous saurions l'entendre à sa place, et surtout le développer ; ce en quoi, cette fois, il se trompait.

Il formula alors explicitement ce que nous pouvons voir comme l'héritage essentiel du courant (ou de l'école) de la directionnalité de l'évolution qu'il incarnait alors.

Pour la découverte duquel nous reprendrons maintenant avec lui le fil de l'évolution des recherches qui suivirent celles de Podolinsky.

Ses profondes connaissances en chimie, en pédologie, en géologie, avaient mis Vernadsky en mesure, compte tenu de cette autre part de connaissance qu'il tirait de ses collègues biologistes évolutionnaires, de les croiser avec la géochimie pour fonder la *biogéochimie*, applicable à la « matière vivante » et vouée à étudier ses relations spatio-temporelles avec l'environnement géologique dans lequel elle se déploie.

Bouclant dans *La Géochimie* (1924) ce lien continu de l'histoire des idées propres à une énergétique de l'évolution, il y reconnaissait lui même tout l'intérêt des propositions de son jeune confrère Ukrainien, Podolinsky, disparu prématurément 30 ans auparavant, tout en appuyant sur la nécessité d'approfondir le problème que ce type d'idées avait posé dans le contexte de l'époque :

L'histoire des idées qui concernent l'énergétique de la vie, prise dans les cadres du Cosmos, nous présente une suite presque ininterrompue de penseurs, de savants et de philosophes arrivant aux mêmes idées plus ou moins indépendamment, mais qui n'ont pas approfondi le problème qu'ils posaient. Il semble que depuis longtemps il régnait une atmosphère favorable aux idées actuelles. On retrouve des indications brèves, non comprise au moment de leur publication, chez les fondateurs même de l'énergétique, chez R. Mayer, chez W. Thomson (Lord Kelvin), chez H. Helmholtz. Un savant ukrainien, S. Podolinsky, a compris toute la portée de ces idées et a tâché de les appliquer à l'étude des phénomènes économiques. Ces idées jouent un grand rôle dans les conceptions des philosophes, dans la philosophie de H. Bergson en particulier [...] Depuis on y est revenu souvent indépendamment, et au XXe siècle ces idées pénètrent de plus en plus notre pensée scientifique, quoiqu'elles n'y aient pas encore acquis la stabilité nécessaire et ne soient pas définitivement entrées dans nos représentations de l'Univers [Vernadsky, 1924:334-335].

Fort de quoi il tiendra particulièrement dans cet ouvrage et le suivant à exposer la part qu'il avait jouée dans l'approfondissement du problème posé par ces idées, afin de permettre leur réelle « stabilisation ».

Mais de quel problème s'agissait-il au juste ? Pour en avoir une vision précise, poursuivons la découverte de ce paragraphe de *La Géochimie : L'énergie de la matière vivante et le principe de Carnot*.

L'histoire géochimique du carbone aboutit nécessairement à ces idées dont l'avenir ne me paraît pas douteux. Les phénomènes étudiés au point de vue de l'énergie sont régis généralement par le principe de Carnot. Nous voyons qu'ils se produisent toujours en liaison avec une dégradation de l'énergie. La quantité de l'énergie active, capable de produire le travail, baisse avec chaque phénomène naturel. L'énergie se dissipe sous forme de chaleur. L'entropie de l'Univers, comme disait Clausius, augmente, et le niveau de chaleur s'égalise. Si l'Univers a une limite, si le complexe des phénomènes naturels a une fin - il doit en résulter la fin du monde - l'égalisation de l'énergie ne permettra de se manifester à aucun phénomène naturel lié à l'énergie. Longtemps on a considéré ces déductions comme des conséquences certaines, comme des lois de la nature, et on n'a pas vu des exceptions à cette règle, si féconde en découvertes scientifiques importantes. L'idée philosophique de la fin du monde était en même temps conforme aux profonds sentiments humains, à des représentations idéalisées anthropomorphiques de la Nature. Et jusqu'à présent la valeur et la généralité du principe de Carnot est très différemment escomptée par les savants et les philosophes. Car en l'état actuel de la science, il existe ici un très vaste champ libre pour des constructions philosophiques et mathématiques. Le premier fait empirique d'une grande généralité et d'une grande importance qui sous ce point de vue paraissait rentrer difficilement dans le cadre des autres phénomènes naturels, était la manifestation de la vie. La dégradation de l'énergie, sa dissipation sous forme de chaleur ne s'effectue pas dans la vie (telle que nous la concevons) des organismes verts à chlorophylle ou des microbes autotrophes. Tout au contraire par le fait

d'existence de ces organismes, la quantité d'énergie capable de produire du travail s'accroît à la fin de leur vie visiblement dans la nature environnante. L'oxygène libre que préparent les plantes vertes, la houille que forment leurs restes, les composés organiques de leurs corps qui nourrissent les animaux, les mouvements et les phénomènes physiques et chimiques très divers et très multiples des êtres organisés, présentent des manifestations de l'énergie active, non suivies d'une dégradation. Les physiologistes qui étudiaient la machine animale et surtout les animaux supérieurs ne se considéraient quelquefois pas obligés de tirer ces conséquences. Cependant le monde animal n'existe qu'aux dépens de la matière vivante verte. Et si les plantes vertes périssaient, il devrait inévitablement partager leur sort. Le monde animal à lui seul ne représente pas la vie. Dans l'intérieur de sa machine l'organisme animal dissipe l'énergie accumulée par les organismes verts à plastides [...] Dans leur ensemble, les animaux et les végétaux, dans toute la Nature vivante, présentent un phénomène naturel, contraire au principe de Carnot, comme il est généralement formulé. Il y a généralement un accroissement d'énergie active dans l'écorce terrestre comme une suite générale de la vie, de toutes ses manifestations. Dans les phénomènes de la biosphère, par le fait de l'existence de la vie, l'entropie de l'Univers devrait diminuer et non s'augmenter [Ibid.:335-337].

Le problème est devenu clair et les idées développées pour le mettre sur la table vont boucler notre enquête sur les suites données aux hypothèses de Podolinsky, et notamment leur extension à la « nouvelle nature de la Nature » (section 1.1.).

Vernadsky nous signifiait clairement dans son texte que la Biosphère représente comme manifestation de la vie une exception au principe de Carnot-Clausius<sup>107</sup> !

Mais en quoi, très exactement ?

#### 2.1.6.4 Quand Clausius interprète l'exception de Vernadsky

L'idée, première entre toutes, qui ressort de ce texte, est que les processus *néguentropiques* de la végétation verte « et » les processus (majoritairement) *entropiques* propres au règne animal et aux autres structures dissipatives de la Nature, intégrés au sein de la Biosphère, participent « dans leur ensemble »<sup>108</sup> d'une telle exception.

Sauf à bien l'interpréter !

Cette idée n'est en effet pas négligeable, relativement aux structures dissipatives de Prigogine (1946, 1968), essentiellement caractérisées par leur production d'entropie. La théorie de Prigogine serait ainsi « englobée » dans la théorie de la Biosphère, et non l'inverse, à savoir que la Biosphère n'est pas une structure dissipative, comme certains voudraient le démontrer, à l'exemple de Kleidon (2004, 2007).

Mais allons maintenant plus loin.

Abordant les changements irréversibles qui s'accomplissent dans les transformations liées à l'énergie, Clausius (1865) avait définie l'entropie comme la « disgrégation » (changement d'organisation des particules) de l'énergie, après qu'elle ait permis à un corps quelconque d'accomplir un certain travail (comme la respiration ou la transpiration).

La variation (d) d'entropie (S) apparaissait d'abord en termes de « flux », dans son équation 59, comme la variation (d) de chaleur (Q) par degré de température absolue (T) en °Kelvin (0°C = 273°K). Ce qui en faisait une nouvelle grandeur (intensive)

<sup>107</sup> Nous le nommerons ainsi dorénavant, ayant découvert que c'était souvent le cas au début du XXe siècle.

<sup>108</sup> Nous verrons que le seul sujet de l'Anthroposphère posait dans cet « ensemble » une question sur laquelle, en son temps de bouleversements radicaux, Vernadsky eut le plus grand mal à statuer.

indépendante de la température (grandeur intensive), signifiant l'état plus ou moins dégradé d'une énergie, la quantité de cette énergie serait-elle constante (1<sup>er</sup> principe) :

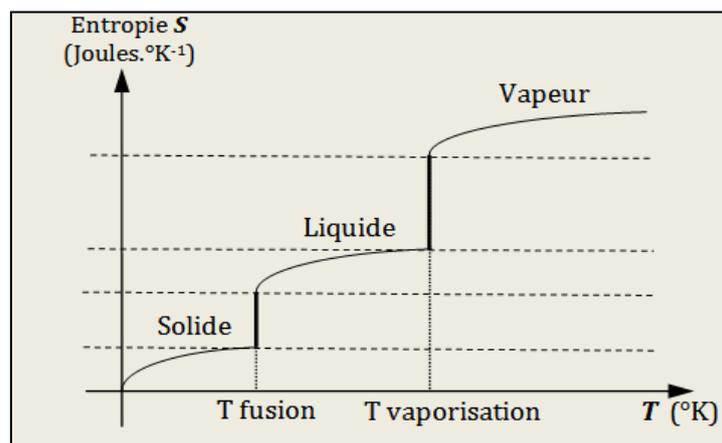
$$dS = \frac{dQ}{T} \quad (1)$$

En termes de « cumul », ou d'entropie totale (S) à la suite d'une transformation énergétique quelconque (comme aussi dans un moteur à explosion), elle devenait dans son équation 60 l'entropie initiale (S<sub>0</sub>) augmentée de l'intégrale des variations d'entropie (dS) subies lors de la transformation. La forme « S - S<sub>0</sub> » devenant à la suite la chaleur dégradée passée d'un corps isolé « vers l'extérieur » de celui-ci :

$$S (\text{entropie}) = S_0 + \int \frac{dQ}{T} \quad \text{ou encore} \quad S - S_0 = \int \frac{dQ}{T} \quad (2)$$

Une bonne représentation de l'entropie S nous est donnée par le schéma suivant, qui illustre les différents « changements d'état » de l'eau.

Figure 9 : L'entropie lors des changements d'état de l'eau



Source : Loiret, 2013a

Il y apparaît clairement que lorsque l'eau passe de l'état solide à l'état liquide puis gazeux, son entropie augmente, mais à température constante, signifiant ainsi que l'entropie représente un changement d'organisation interne des particules indépendant de la température.

Et aussi que l'entropie est nulle au 0 absolu !

Plus loin, au chapitre 16, qui devançait le 17 concluant sur l'expression de son très fameux principe, *L'entropie de l'univers tend vers un maximum*, Clausius introduisait avec l'équation 70 une grandeur « N », qui représentait la chaleur (non dégradée) que le corps isolé recevait « de l'extérieur » (Clausius, 1865:396-398) :

$$N = - \int \frac{dQ}{T} \quad (3)$$

Il finissait son paragraphe en disant que, dans le cas d'inversion d'un processus de transformation (transformation réversible), il fallait inverser le résultat final (de l'équation

2) et l'exprimer sous la forme «  $S_0 - S$  ». De nos équations 2 et 3, il nous permettait donc, sauf erreur, d'en déduire la suivante :

$$S_0 - S = N = - \int \frac{dQ}{T} \quad \text{ou encore} \quad -S = -S_0 - \int \frac{dQ}{T} \quad (4)$$

$N$  (ou  $S_0 - S$ ) devenait ainsi dans ce cas une variation négative d'entropie entre deux états, nous montrant bien que l'entropie négative ( $-S$ ) participait pour Clausius d'une évidence.

Nous pouvons en conclure que la vraie question, fondamentale, soulevée par le *second principe* n'était pas celle de l'entropie négative, qui, selon certains auteurs, serait un concept absent de la physique :

La question de l'organisation biologique, de sa mise en place, de son évolution et de son maintien a été abordée sous des angles très variés : biologie moléculaire, génétique, système dynamique ouvert loin de l'équilibre, etc. Toutefois, un des aspects qui demeurent les plus controversés est constitué par l'aspect thermodynamique : l'organisation biologique, en effet, peut être interprétée en termes d'entropie négative, concept absent de la physique... [Bailly et Longo, 2008:1].

La vraie question intervenait juste après, au chapitre 17 final :

Sous la forme que je lui ai donnée, ce second théorème principal de la théorie mécanique de la chaleur<sup>109</sup> exprime que toutes les transformations qui ont lieu dans la nature peuvent se produire d'elles-mêmes, c'est à dire sans compensation, dans un certain sens que j'ai regardé comme positif, ... [Clausius, 1865:398].

Les transformations dans ce sens étaient donc assimilables à une production d'entropie positive.

Ce à quoi il ajoutait :

... mais ces transformations ne peuvent s'effectuer dans le sens contraire ou négatif, que lorsqu'elles sont compensées par d'autres transformations positives et simultanées [Ibid.: 398-399].

C'est à dire qu'une transformation pouvait sans problème agir dans le sens contraire, assimilable à un flux d'entropie négative, sauf à produire une compensation générant elle-même de l'entropie positive.

Le solde additif des deux transformations était donc forcément et dans tous les cas nul ou positif en terme d'entropie ( $S - S_0 \geq 0$ ), ce qui permettra à Clausius, en le généralisant, d'introduire la forme détaillée de sa conclusion universelle :

L'application de ce théorème à l'univers entier conduit à une conclusion sur laquelle M. Thomson a déjà appelé l'attention, et dont j'ai parlé dans un mémoire publié récemment [Ibid.:399].

A savoir que :

Si dans tous les changements d'état qui se produisent dans l'univers, les transformations effectuées dans un certain sens surpassent celles qui se produisent en sens contraire, il faut que l'état de l'univers se modifie de plus en plus dans le premier sens, c'est à dire qu'il tende de manière continue vers un état limite [Ibid.].

Ainsi, l'entropie de l'univers n'était pas une affirmation unidirectionnelle, niant toute existence d'une entropie de signe négatif (question qui a constitué tout au long de la seconde moitié du XXe siècle un quasi fond commun de la physique), mais

---

<sup>109</sup> Le second principe de la thermodynamique.

essentiellement le solde d'un bilan de type « redox » entre une production d'entropie positive et négative, dont la positive apparaissait systématiquement supérieure à la négative, étant donné la compensation positive que cette dernière génère systématiquement.

Nous atteignons ainsi le « cœur » de l'argumentation d'Engels vis à vis de la théorie de Podolinsky, restreignant à priori toute extension de celle-ci à l'échelle planétaire ; à savoir qu'il ne saurait y avoir une production « quelconque » de néguentropie sans générer en sens contraire une entropie positive systématiquement, universellement, supérieure.

D'où le principe resté toujours ambigu de production d'ordre par le désordre, puis par l'ordre, de Schrödinger, Von Bertalanffy, Prigogine, Morin, etc.

Qui expliquerait entre autres le problème du recyclage des déchets, en supposant que la perte d'énergie serait systématiquement supérieure à l'énergie récupérée.

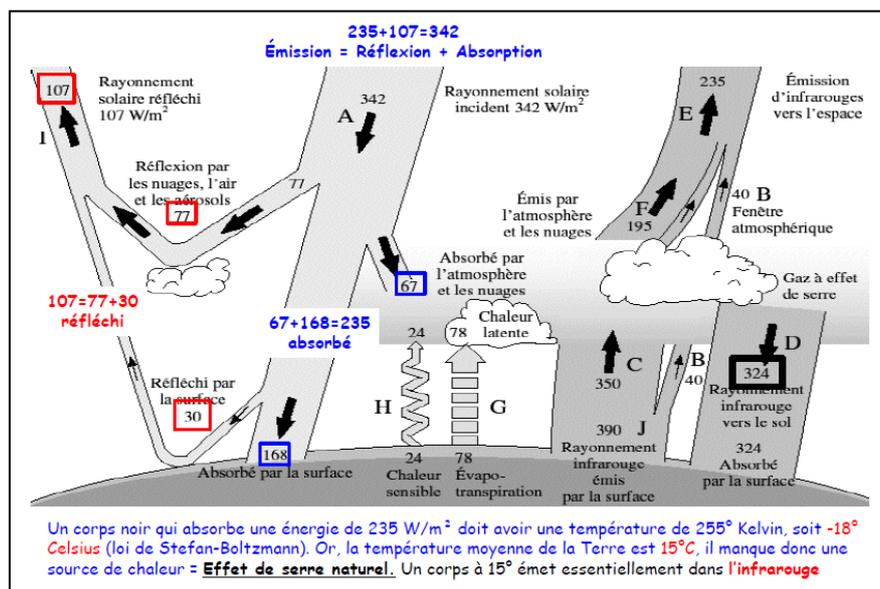
Mais alors, puisque le second principe, tout comme la Biosphère, intègre à l'origine entropies positives et négatives, en quoi consistait l'exception qu'elle constituait ?

Essayons maintenant de le faire apparaître.

Clausius a montré que la néguentropie, en tant que « flux » d'énergie libre, ou encore de chaleur, provenant de la source solaire alimentait les processus dissipatifs universels de combustion (ou d'oxydation).

Et en tant que tel, entropies négatives et positives mènent ensemble à l'équilibre thermodynamique, serait-il longuement retardé, comme le montrent par exemple les bilans radiatifs (entropiques) de la Terre, qui lui donnent, à l'équilibre, une température hypothétique moyenne de surface de  $-18^{\circ}$  (C).

Figure 10 : Bilan radiatif de la Terre, en  $W/m^2$



Source : Francour, 2007

Ceci quand la température moyenne de surface réelle de la Terre est de  $15^{\circ}$ .

D'où provient cette différence ?

Francour (2007) nous dit qu'elle provient de l'effet de serre naturel. Certes, mais que serait l'effet de serre sans un compartiment thermodynamique constitué, l'atmosphère,

duquel le CO<sub>2</sub> piégé ne peut s'échapper, sauf à être absorbé par ses compartiments contigus, l'hydrosphère et la lithosphère !

Compartiments qui tous ensemble forment justement cette « exception » que constitue la Biosphère !

Comme nous l'avons vu, la Biosphère se développe dans les biogéocénoses de l'Ecosphère, dans une direction les amenant de plus en plus loin de l'équilibre.

Et en leur sein, l'aromorphose concentre l'énergie vitale du vivant.

Mais celle-ci, bien que formée par l'énergie libre, est d'une nature bien plus subtile que cette dernière.

Entre le second principe et la Biosphère, il y a le vivant, dont il résulte des processus essentiels, bidirectionnels (comme pour le second principe), une accumulation d'énergie vitale, faite simultanément de matière et d'énergie, soit une « matière énergétique », que Vernadsky a nommée tantôt l'énergie *biogéochimique*, tantôt l'énergie *géochemique* (nous verrons plus tard combien la différence entre les deux est importante).

Ce qui met en exergue une fonction « redox » du vivant qui serait active depuis les processus les plus élémentaires de la Biosphère jusqu'aux fonctions internes des organismes vivants, en passant par les biogéocénoses de l'Ecosphère,

La différence entre énergie *biogéochimique* et énergie *libre* apparaît dès lors comme essentielle ; chaque gramme d'énergie biogéochimique a en effet « capté » (encapsulé, stocké) un certain quantum d'énergie libre, normalement voué à la dissipation (cf. bilan radiatif), et cependant « conquis » aux dépens du second principe, manifestant ainsi la contradiction de chaque gramme de matière énergétique vivante vis à vis de la conclusion de Clausius.

Cette matière énergétique se concentre (est stockée) dans les champs thermodynamiques, entourés par leur enveloppe spécifique, de la cellule à l'organisme, et de l'organisme à l'Ecosphère, spécifiques aux organismes vivants.

Cette « énergie matérielle » constitue ainsi une pression (p), un volume (V), et une température (T) spécifiques, à l'intérieur des organismes et écosystèmes, systèmes devenant macrosystèmes, ouverts (enfin presque, nous verrons la nouvelle distinction entre systèmes qu'ont introduit deux biogéochimistes russes en 2008) jusqu'à former les champs thermodynamiques de la Biosphère.

Et l'évolution des espèces, au long des aromorphoses planétaires, au sein des biogéocénoses, intensifie par leurs fonctions redox cette énergie matérielle, géo et biogéochimique, vue comme énergie « pV »<sup>110</sup>, stockée dans les enveloppes du vivant et de la matière biogène.

Intensité énergétique pV partout différenciée dans ces enveloppes organiques du vivant, ou provenant du vivant, où elles constituent ensemble la « biodiversité », dont la mesure « différentielle » constitue de proche en proche la distance à l'équilibre thermodynamique des organismes, des biogéocénoses, puis de l'Ecosphère entière.

Energie biogéochimique, qui deviendra ensuite énergie géochimique biogène de la matière organique (biomasse), qui est finalement envoyée par subduction dans les couches

---

<sup>110</sup> La combinaison de la variable thermodynamique de pression « p », mesurée en joules/m<sup>3</sup>, avec la variable thermodynamique de volume « V », mesurée en m<sup>3</sup>, nous donne des joules, soit l'énergie spécifique « pV ».

profondes de la Biosphère pour constituer ses stocks permanents, notamment de carbone.

Jusqu'à la « stabilisation parfaite » (à l'exemple du graphite et du diamant) de cette énergie incorporée. Les stocks de matière biogène ainsi stabilisés, « stabilisent » à leur tour la distance à l'équilibre de la Biosphère, et maintiennent en continu le différentiel thermodynamique entre ses compartiments (atmosphère, hydrosphère, lithosphère), ceci jusqu'à stabiliser, notamment, la phase « liquide » de l'eau.

Les limites de la biosphère sont déterminées en premier lieu par le champ d'existence vitale. La vie ne peut se manifester, que dans un milieu déterminé, dans des conditions physiques et chimiques déterminées [...] Il est toutefois hors de doute que le champ de la stabilité vitale dépasse les limites de ce milieu. On ignore même de combien il peut le dépasser, car il est impossible d'évaluer quantitativement la force d'adaptation des organismes dans l'espace des temps géologiques [...] Le champ de la stabilité vitale n'est en conséquence que le produit de l'adaptation effectuée au cours du temps [...] Ce champ, comme le démontre l'étude de la paléontologie et de l'écologie, s'élargit lentement et graduellement au cours de l'existence de la planète [...] Elle (la Biosphère) a des frontières définies, qui semblent être déterminées par la présence des conditions nécessaires à l'existence stable de la phase liquide de l'eau [Vernadsky, 1929:163-166].

Ainsi, la grande, l'immense, différence entre le second principe et le principe actif de la Biosphère, c'est cette capacité, semble-t-il unique dans notre univers, et en tous cas exceptionnelle, de « stockage » de l'entropie négative, en forme d'énergie biogéochimique constitutive de sa distance à l'équilibre.

Cette exception étant un peu clarifiée, nous débouchons sur une nouvelle théorie d'accumulation énergétique, présentant des caractères très similaires au bilan redox de Clausius (solde des + et des - entropiques), mais pourtant fondamentalement différente en ce que son « solde final » génère une direction de l'évolution allant en sens contraire du second principe.

Théorie d'accumulation qui est par contre identique à celle de Podolinsky, sauf cette fois à s'étendre à l'ensemble de la Biosphère, et plus précisément de l'Ecosphère.

Cette dernière étant vue (nous nous répétons, mais c'est, ici, volontaire) comme cette partie de la Biosphère regroupant toutes les *biogéocénoses*, qui serait issue d'un processus d'*aromorphose* étendu à l'échelle planétaire, et aboutissant à l'*endosymbiose*, soit l'apparition des eucaryotes, mono puis multicellulaires, et avec eux les plantes vertes et les animaux<sup>111</sup>.

L'exception de Vernadsky exprime ainsi tout particulièrement que *la production d'entropie des structures dissipatives (biogènes, végétales et animales) participe du processus planétaire de stockage d'énergie libre, à travers l'accumulation d'énergie biogéochimique.*

Ou dit autrement, puisque la Biosphère « incarne » le cycle idéal de Carnot malgré la dissipation énergétique, *elle n'a pu le faire qu'en utilisant à son profit l'irréversibilité entropique.*

Mieux encore, puisque la Biosphère démontre depuis l'origine de sa formation une farouche accumulation d'énergie géochimique (notamment tous ses stocks de carbone et d'énergie fossile), cela voudrait dire que *plus les règnes animaux et autres structures dissipatives de l'Ecosphère auraient produit d'entropie, plus les biogéocénoses (soit les écosystèmes strictement « naturels ») auraient stocké de néguentropie !*

---

<sup>111</sup> Nous avons les figures 1 et 3 qui présentaient la relation Ecosphère/Biosphère, la figure 12 à venir deux pages plus loin la précisera un peu plus.

Ainsi, plus le second principe aurait été efficace, plus le vivant l'aurait été de même, mais strictement à contresens !

Tout ceci fondant l'existence d'un nouveau principe thermodynamique qui rendrait compte, en même temps que du second principe, de l'hypothèse primitive d'accumulation énergétique de Podolinsky, à l'échelle globale du vivant !

Un principe qui reste à formuler un peu plus clairement !

Vernadsky a commencé à le faire, mais sans avoir, pour les différentes raisons que nous avons exposées, le temps, les moyens, la possibilité, ... de le finaliser.

Nous chercherons pour notre part à l'envisager en conclusion de cette section.

Ceci nous montre au passage à quel point chaque apport spécifique des membres du courant russe de la directionnalité, constitua une brique qui s'avéra essentielle à la construction du métaconcept de Biosphère.

Soit au global une révélation qui constituait *la véritable révolution*, paradigmatique, de Vernadsky (et de ses confrères), et qui formait la réponse catégorique et définitive des anciens aristocrates russes - nous parlons ici de leur frange résolument « démocratique » - aux critiques d'Engels à l'encontre de la *merveilleuse découverte* de Podolinsky, et plus loin à l'ensemble des futurs adeptes strictement matérialistes de Marx et Engels.

Ainsi qu'une réponse définitive aux questionnements incessants qui, *cette révolution ayant été occultée par celle de Marx et Engels*, tourneront tout au long de la seconde moitié du XXe siècle autour d'un problème<sup>112</sup> « déjà résolu » (mais non connu) par Vernadsky et ses collègues (Schrödinger, 1944; Brillouin, 1956; Bonsack, 1961; Von Bertalanffy, 1968; Morin, 1977; Atlan, 1979; Passet, 1979; Sheldrake, 1981; Lussato, 1987; Ducrocq, 1989; Odum, 1996; ...et bien d'autres avec eux).

Ceci nous montre bien que la vieille Europe (et derrière elle les Etats Unis), n'avait quasiment rien entendu du vrai trésor constituant l'héritage dont Vernadsky lui avait fait don !

Et cela tendrait à nous montrer qu'une vraie révolution, politique et scientifique, ne saurait fonctionner sans être dans le même temps « paradigmatique ».

Car cette révolution apparaissait finalement bien contradictoire aux affirmations de Liebig quant à ce nouveau principe universel : la loi des rendements décroissants !

Elle rendait cette loi universelle essentiellement relative aux sols « agricoles » d'une nature enfermée par l'homme dans les cadres de l'Anthroposphère, et les limites d'une pensée économique qui, comme nous l'avons vu, répondait dorénavant en toutes choses du nouveau principe d'usure.

Cela rendrait tout aussi relatif cet édifice (se voudrait-il lui aussi universel) d'une Empreinte écologique supposée rendre compte tout autant de la loi de Liebig que du principe d'usure, dans son interprétation la plus restrictive.

Mais pas des principes fondamentaux de la Biosphère.

---

<sup>112</sup> Que Von Bertalanffy (1968) nommait « la contradiction apparente entre l'entropie et l'évolution ».

### 2.1.6.5 Principes fondamentaux de la Biosphère<sup>113</sup>

Ainsi, non seulement Vernadsky avait « exprimé » cette contradiction, mais tout l'édifice de la Biosphère venait derrière l'appuyer pour, comme il est dit vulgairement, « enfoncer le clou ».

Clou à ce point enfoncé que quiconque en douterait (nous aurions pu facilement imaginer dans ce rôle Sir Arthur Eddington) devrait bâtir un édifice contradictoire à celui de la Biosphère ! Bon courage !

C'est ainsi que la biologie évolutionnaire avait « évolué » avec Vernadsky vers ce que nous pourrions nommer la *biogéologie évolutionnaire*, c'est à dire l'étude des relations intimes entre la formation progressive des strates du vivant et la formation corrélative en feedback d'un environnement propice à l'évolution des espèces.

Car en effet, l'introduction du substrat géologique comme support de la biogécénose aura permis d'observer toutes les interventions de la matière vivante visant à modifier son environnement originellement inerte, afin de le rendre compatible avec les conditions de son développement et de maximaliser le recyclage matériel, qui en retour optimise la production de vivant.

Boucle rétroactive entre le vivant et l'inerte qui apparaît comme une caractéristique fondamentale de la Biosphère (et de l'Ecosphère), avec comme résultante la production de l'atmosphère terrestre, la « stabilisation » de l'eau liquide, ..., c'est à dire l'apparition d'un troisième type de matière (entre la matière vivante et inerte) produite par les différents processus biogéochimiques « redox », et nommée *matière biogène* par Vernadsky.

Cette résultante établit un lien étroit entre la biologie et la géochimie, et constituerait comme tel un complément fondamental de la théorie de l'évolution. Comme le disait Vernadsky :

(Une analyse approfondie) fait voir en effet qu'il s'agit, en partie, de phénomènes identiques se traduisant diversement, en partie de phénomènes vitaux, effectivement différents, considérés différemment, soit du point de vue de la géochimie, soit, au contraire, de la biologie. La comparaison de ces deux points de vue transforme la conception scientifique des phénomènes de la vie et lui donne plus de profondeur. La différence de ces deux représentations de la vie se manifeste, d'une manière particulièrement frappante, dans le fait que la théorie de l'évolution, qui pénètre toute la conception biologique actuelle de l'univers, ne joue presque aucun rôle en géochimie [...] Ainsi, l'espèce est habituellement considérée dans la biologie du point de vue *géométrique* ; la forme et les caractères *morphologiques* y jouent la première place. Dans les phénomènes biogéochimiques au contraire celle-ci est réservée au nombre et l'espèce est considérée du point de vue *arithmétique* [...] Dans les processus biogéochimiques, il est indispensable de prendre en compte les constantes numériques suivantes : le *poids* moyen de l'organisme, sa *composition chimique élémentaire moyenne* et l'*énergie géochimique moyenne* qui lui est propre, c'est à dire sa faculté de produire des déplacements, autrement dit « la migration » des éléments chimiques<sup>114</sup> dans le milieu vital [Vernadsky, 1929:251-253].

Ainsi la biogéochimie amenait avec elle une corrélation étroite entre la construction structurale des compartiments de la Biosphère (atmosphère, hydrosphère, lithosphère), l'évolution des espèces, et l'*énergétique* de cette évolution. Et ceci au point que la matière

<sup>113</sup> Nous approfondirons plus loin ces principes, notamment les fonctions redox de la Biosphère et de l'Ecosphère.

<sup>114</sup> Notons que ce concept de *migration des éléments chimiques* introduit les « cycles biogéochimiques ».

vivante devenait un facteur indissociable de la transformation chimique de ces compartiments, jusqu'à s'étendre à la géologie interne de l'écorce terrestre.

Ainsi nous avons en tout 17 à 19 éléments chimiques qui se concentrent dans la matière vivante. Cette concentration devient des plus importantes par le fait que ces organismes, concentrateurs d'éléments chimiques spéciaux, ne sont pas des organismes rares, mais des organismes qui se trouvent en grandes quantités, qui donnent des masses considérables de matière, riche en un élément donné, jouent un rôle éminent dans l'économie de la nature [...] Par l'intermédiaire de ces organismes concentrateurs spéciaux des éléments chimiques, la matière vivante régularise la chimie de ces éléments dans l'écorce terrestre. Il est clair que ce n'est pas un fait occasionnel, mais que par ce procédé la matière vivante de cette composition spéciale entre comme une partie intégrante dans le mécanisme chimique de l'écorce [Vernadsky, 1924:297].

Mais ceci ne serait possible qu'en maintenant une frontière infranchissable, en forme de membrane cellulaire, isolant absolument la matière vivante de la matière brute, vérifiant *le principe de Redi* selon lequel il n'a jamais existé nulle part, au cours de l'évolution, de possibilité d'une *abiogénèse* (étude de la génération du vivant à partir de la matière inerte).

Et c'est l'existence de cette frontière infranchissable, la *stabilité* de la membrane cellulaire à toutes les échelles du vivant qui, seule, établirait la possibilité des flux dynamiques de matière et d'énergie entre le vivant et le monde extérieur, et avec eux les *cycles biogéochimiques* de la Biosphère, comme interface relationnel entre matière vivante et matière brute (Vernadsky, 1924:332-333).

C'est ainsi qu'étaient données de nouvelles fondations à cette dimension *biophysique* de l'environnement tant recherchée (depuis Podolinsky, et avant lui par la Physiocratie).

Et c'est pour couler le béton de ces fondations que Vernadsky avait introduit la thermodynamique, comme outil descriptif central de l'évolution des espèces « au sein de la Biosphère ».

Ces membranes et frontières du vivant formaient en effet des « champs thermodynamiques » spécifiques, inconnus de la matière brute. Et ceci depuis l'échelle cellulaire élémentaire des procaryotes de la Biosphère originelle, jusqu'aux eucaryotes multicellulaires et aux biogéocénoses de l'Ecosphère.

L'Ecosphère, que Vernadsky n'avait pu alors nommer<sup>115</sup>, étant vue elle-même comme un champ thermodynamique entièrement à part, entouré de son enveloppe spécifique, au sein du champ thermodynamique plus global de la Biosphère.

Elle était symboliquement la « maison » du vivant, quand la Biosphère était le « domaine » (du vivant) dans lequel était bâtie cette maison (Loiret, 2012a, 2013a).

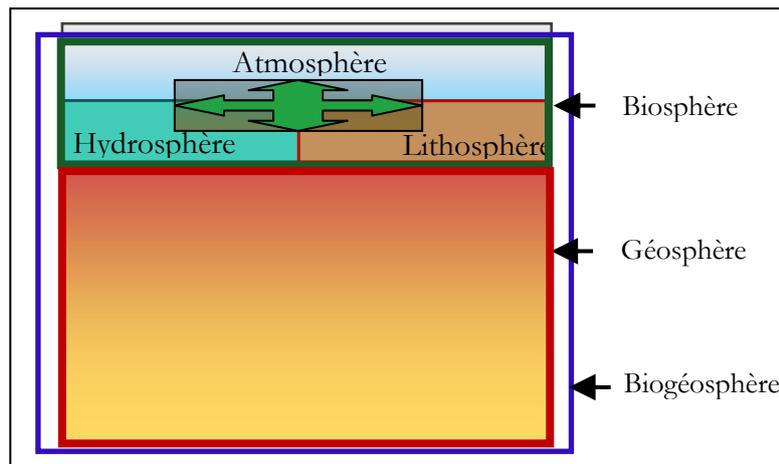
Une distinction qui s'avèrera particulièrement importante au long de nos démonstrations.

Et que nous avons représentée ainsi, dans le contexte de l'évolution planétaire, le premier schéma ci-dessous donnant une vue plus globale que le suivant.

---

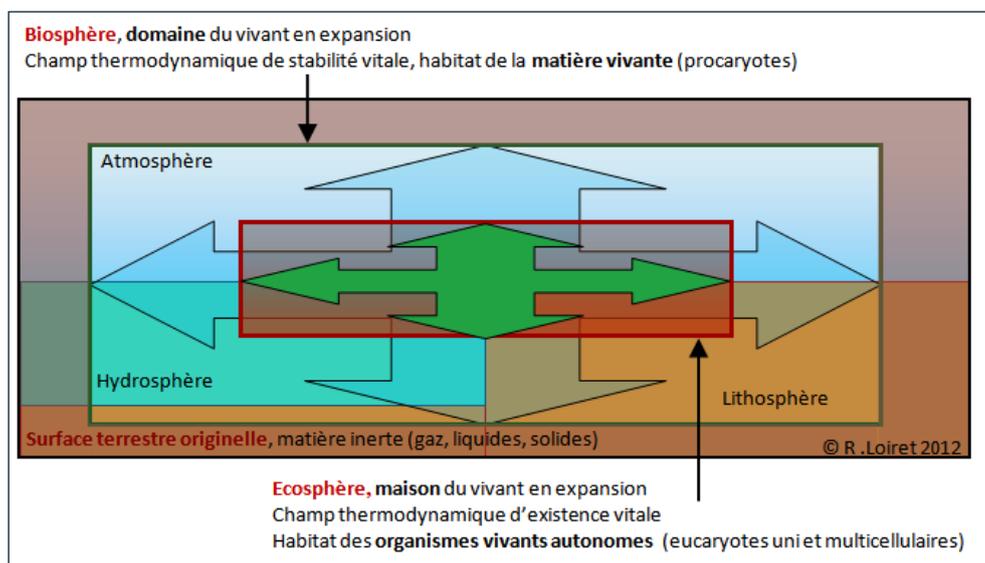
<sup>115</sup> Nous expliquerons pourquoi dans la deuxième section de ce chapitre.

Figure 11 : Biosphère et Géosphère, ou Biogéosphère



Source : Loiret, 2012a

Figure 12 : Biosphère et Ecosphère en expansion, selon Vernadsky



Source : Loiret, 2013a

Vernadsky tenait ses connaissances en thermodynamique d'un premier séjour en France, de février 1889 à juillet 1890, lors duquel il avait travaillé auprès du chimiste Henry Le Chatelier (1850-1936), qui a établi le principe du déplacement d'équilibre chimique, dit *principe Le Chatelier* ; par lequel un système chimique à l'équilibre soumis à une perturbation tend à revenir à son état premier (Bailes, 1990 ; Loiret, 2012a).

Et c'est Le Chatelier lui même qui poussa Vernadsky à utiliser l'arithmétique et les mathématiques pour mieux comprendre la chimie, la minéralogie et la cristallographie<sup>116</sup> ; et pour ce faire de suivre la voie tracée par l'américain Josiah Willard Gibbs (1839-1903)<sup>117</sup>, qui a appliqué la thermodynamique à la chimie et a défini la fonction « Enthalpie libre », dite aussi

<sup>116</sup> Qui furent ses premières spécialités avant qu'il fonde la Biogéochimie (Bailes, 1990).

<sup>117</sup> Ses plus importants travaux ont été publiés sous le titre *Équilibre des substances hétérogènes* (1876-1878) et constituent la base de la thermodynamique chimique.

« Energie libre de Gibbs », qui caractérise l'énergie solaire captée et stockée par les organismes vivants autotrophes (Bailes, 1990:43-44 ; Loiret, 2012a).

Un enseignement de plus, qui le fit pénétrer cette fois de plein pied dans le monde de la thermodynamique. Il l'appliqua d'abord à la minéralogie, puis à la géochimie et à la biologie pour en tirer dès 1917 (Bailes, 1990:43-44) les grands principes des cycles géochimiques de la Biosphère, indissolublement liés au développement des organismes vivants. Ce dont il témoignait ainsi :

La migration biogène provoquée par l'intervention de la vie compte, envisagée dans son ensemble, parmi les processus les plus grandioses et les plus typiques de la biosphère et constitue le trait essentiel de son mécanisme. (...) Cuvier a donné une définition précise et juste de l'organisme vivant durant sa vie, comme d'un courant incessant, d'un tourbillon d'atomes qui vient de l'extérieur et y retourne. L'organisme vit aussi longtemps que le courant d'atomes subsiste. Ce courant englobe toute la matière de l'organisme. Chaque organisme par lui-même ou tous les organismes ensemble créent continuellement par la respiration, la nutrition, le métabolisme interne, la reproduction, un courant biogène d'atomes, qui construit et maintient la matière vivante. En somme, c'est là la forme essentielle et principale de la migration biogène, dont l'importance numérique est déterminée par la masse de matière vivante existant à un moment donné sur notre planète. Mais ce n'est encore là toute la migration biogène (...)

La migration biogène n'est qu'un élément d'un autre processus de la biosphère encore plus puissant, autrement dit de la migration générale de ses éléments. Cette migration s'effectue partiellement sous l'influence de l'énergie solaire, de la force de la gravitation et de l'action des parties internes de l'écorce terrestre sur la biosphère. Tous ces déplacements des éléments, quelle qu'en soit la cause, répondent à divers systèmes d'équilibre mécaniques déterminés ; en particulier, dans l'histoire de divers éléments chimiques, ils donnent naissance à des cycles géochimiques fermés, à des tourbillons d'atomes. Ils peuvent tous être ramenés aux lois des équilibres hétérogènes et aux principes formulés par W. Gibbs. Les processus cycliques auxquels participe la migration biogène sont entretenus par une force extérieure dont l'afflux ininterrompu les renouvelle. Les forces de l'énergie solaire radiante et de l'énergie atomique jouent dans le renouvellement de ces processus un rôle prépondérant. Ces équilibres, étudiés en dehors de cet afflux d'énergie extérieur, sont des systèmes mécaniques qui arrivent nécessairement à un état stable. Leur énergie libre sera nulle ou voisine de zéro à la fin du processus, car tout le travail susceptible d'être accompli dans ce système le sera en fin de compte nécessairement. Dans les équilibres de cette espèce le travail atteint toujours un maximum, tandis que l'énergie à l'état libre tend vers un minimum. La migration biogène est une des principales formes du travail dans ces systèmes d'équilibres naturels et évidemment elle doit tendre vers une manifestation maximale. On peut considérer cette propriété de la migration biogène comme principe géochimique essentiel qui régit de façon automatique les phénomènes biogéochimiques [Vernadsky, 1929: 260-264].

Vernadsky parlait ici des organismes et de leurs ensembles systémiques au sein des biogéocénoses, qui reçoivent l'énergie libre solaire et échangent dans le même temps les éléments chimiques provenant de la *migration biogène* entretenue par les *cycles biogéochimiques*. Il étendait ainsi forcément la thermodynamique aux *systèmes ouverts* (qui échangent énergie et matière avec l'environnement).

Il introduisait ainsi une notion qui, une fois « nommée », connaîtra avec Von Bertalanffy (1968) un immense succès après la seconde guerre mondiale.

Et il introduisait à sa suite, sans la nommer, la notion de *structure dissipative* (qui maintient son ordre interne en consommant l'ordre extérieur), développée par Prigogine (1946, 1968), qui étendait avec elle la thermodynamique aux systèmes ouverts.

Il précisait que le côté strictement dissipatif et producteur d'entropie de ces structures, qui chez Prigogine les caractérise « exclusivement », était intégré 30 ans avant leur nomination comme « parties prenantes » du concept global de Biosphère ; où les

structures dissipatives participent des processus thermodynamiques d'accumulation d'énergie libre par le vivant. Ce que Von Bertalanffy lui-même n'a semble-t-il pas entièrement compris.

... sur la base de la théorie des systèmes ouverts, la contradiction apparente entre l'entropie et l'évolution disparaît. Dans tous les processus irréversibles l'entropie doit croître. La variation d'entropie dans les systèmes ouverts est donc toujours positive ; l'ordre est continuellement détruit. [Von Bertalanffy, 1968:39].

Nous voici ainsi ramenés à la notion de *champ thermodynamique* des organismes vivants, vue comme produit de la relation biogéochimique établie entre ces organismes et leur environnement, et dont la fonction essentielle devient la *concentration énergétique*<sup>118</sup> et la stabilisation des biogéocénoses.

Le niveau énergétique stabilisé des organismes vivants devient de ce fait un indice essentiel rendant compte de leur spécificité, et plus loin, comme nous en développerons le concept, de la « biodiversité » de leurs communautés vue comme une mesure « différentielle » de leur intensité énergétique.

Vernadsky ouvrait ainsi avec ces champs énergétiques autonomes du vivant la voie d'une synergie entre la biogéologie évolutionnaire et la thermodynamique, menant à une *thermodynamique du vivant* qui constituera la pierre du sommet bouclant, en les reliant, l'ensemble des dimensions du métaconcept de Biosphère.

Il reprenait le concept d'aromorphose de son collègue Sewertzoff<sup>119</sup>, pour l'étendre à la Biosphère. Le reformulant globalement par une *généralisation empirique* que nous exprimerons ainsi :

Il existe une *direction* de l'évolution telle à maximiser la production d'énergie *biogéochimique* des organismes vivants, et à stabiliser les *compartiments thermodynamiques* de la Biosphère.

Et c'est bien tout cet acquis qu'il tenait particulièrement à nous transmettre, informé comme il l'était des pratiques de sa nouvelle patrie.

### 2.1.6.6 Les deux principes de la biogéochimie

Il intégra pour ce faire les conclusions essentielles de son œuvre dans ses publications françaises. Il les formula tout d'abord de manière relativement informelle dans un chapitre de *La Géochimie* (Vernadsky, 1924) intitulé *Le carbone et la matière vivante*, et notamment au paragraphe 20 : *Energie de la matière vivante et principe de Carnot*.

Il considérait à l'époque que la contradiction au principe de Carnot-Clausius était, par *le seul fait de l'existence de la vie*, d'une telle évidence qu'il n'était pas nécessaire d'en tirer des hypothèses nouvelles, d'autant que lui-même fonctionnait comme nous l'avons vu à partir de généralisations empiriques.

Dans les phénomènes de la biosphère, par le fait de l'existence de la vie, l'entropie de l'Univers devrait diminuer et non s'augmenter. Cette observation a donné lieu à de nouvelles spéculations.

<sup>118</sup> Que nous verrons comme le produit  $pV$  de la pression  $p$  et du volume  $V$  de ces champs thermodynamiques.

<sup>119</sup> Qu'il a régulièrement fréquenté (Levit, 2007a). Précisons à cet endroit que les bolchéviques usèrent aussi de leur influence à l'égard de Vernadsky pour lui faire modifier, après son retour en URSS, certains éléments de sa théorie de la Biosphère qui n'allaient pas dans le sens du *Matérialisme dialectique*. Mais dans une moindre mesure que Sewertzoff, les conditions exceptionnelles de son retour l'ayant en effet rendu bien moins manipulable que ce dernier.

Un physicien allemand, B. Auerbach y a vu l'expression d'un nouveau principe, contraire à l'entropie. Il l'a nommé *ectropie*. Lui et d'autres ont tâché d'en déduire les conséquences cosmogoniques. Rien cependant ne nous oblige à faire des hypothèses nouvelles. L'entropie de Clausius n'a pas d'existence propre, ce n'est pas une entité, c'est une expression mathématique. Ces expressions sont toujours approximatives quand on les compare aux faits naturels. La conséquence qui découle du fait constaté de la manifestation énergétique spéciale de la vie, est que le principe de Carnot est, dans son énoncé primitif, trop simpliste, qu'il peut avoir une interprétation moins absolue, qu'il n'est pas universel [Vernadsky, 1924:337-338].

Mais après *La Géochimie* son opinion évoluera rapidement quant au formalisme de ses conclusions. Il faut croire que ces « nouvelles spéculations » qui apparaissaient de tous côtés le forcèrent lui-même à préciser sa vision de cette « manifestation énergétique spéciale de la vie » qui rendait le principe de Carnot si « simpliste » dans son énoncé.

De son vivant, la notion d'*exergie* telle que nous avons survolée au premier chapitre n'existait pas. Tout comme l'entropie négative d'ailleurs, qui bien que très clairement formulée comme nous l'avons vu par Clausius, n'apparaîtra explicitement qu'avec Schrödinger (1944), pour être reprise ensuite par Wiener (1950) puis par d'autres auteurs comme Léon Brillouin (1956).

Conscient cependant de la nécessité de traduire la différence entre l'énergie « libre » de Gibbs et son expression « physique », une fois incorporée dans la « matière vivante », il formula en 1925, quelques mois après la publication de *La Géochimie*, dans un rapport destiné à la fondation Rosenthal (Paris), le concept d'une énergie libre du (incorporée dans le) vivant, spécifique à la Biosphère (et l'Ecosphère), qu'il nomma *énergie biogéochimique*. Il y fait référence dans un article de 1938, *On the Fundamental Material-Energetic Distinction Between Living and Nonliving Natural Bodies of The Biosphere*, qui ne fut traduit en anglais qu'en 2001.

The concept of biogeochemical energy was introduced by me in 1925, in my report to the Rosenthal Foundation in Paris, which was never published in full. In my book, I deal with this question to the extent possible today [Vernadsky, 1938:27].

C'est en s'appuyant sur ce concept, une fois celui-ci bien « stabilisé », qu'il fera évoluer les principes de la Biosphère en direction d'une loi de formation et d'évolution de la matière et des organismes vivants, qu'il exprimera en deux temps, dans deux articles se faisant suite.

Le premier, *L'évolution des espèces et la matière vivante*, se trouve dans l'appendice de la traduction française de *La biosphère* (Vernadsky, 1929).

Le second, *L'étude de la vie et la nouvelle physique* (Vernadsky, 1930), ne nous fut accessible qu'après la Pérestroïka, en 1989.

Entre les deux, il aura affiné puis « stabilisé » (là aussi) ce qu'il nommera *Les deux principes de la biogéochimie*, vus comme piliers de l'affirmation d'une direction de l'évolution contraire à l'entropie croissante de l'Univers !

Ces deux principes, qui constituent ce que nous devrions nommer le *testament scientifique* de Vernadsky, auront pourtant échappé tant à ses nouveaux protecteurs, qu'à bon nombre de ses commentateurs occidentaux !

**≈ Les deux principes de la biogéochimie ≈**

(a) Premier principe biogéochimique :

L'énergie géochimique biogène tend dans la Biosphère à sa manifestation maximale [Vernadsky, 1930:12].

(b) Second principe biogéochimique :

Lors de l'évolution des espèces, ce sont les organismes augmentant par leur vie l'énergie géochimique biogène qui survivent [Ibid.].

(c) Formulation élargie du second principe biogéochimique :

Lors de l'évolution des espèces, la composition chimique de la matière vivante demeure constante, mais l'énergie géochimique biogène apportée par la matière vivante dans le milieu cosmique s'accroît [Ibid.].

Formulation à laquelle il ajoutait dans son article de 1930 le commentaire suivant :

Ce n'est pas un amoindrissement de l'énergie libre, mais un accroissement qui s'effectue dans le milieu cosmique comme résultat de la vie. La vie procède dans ce cas de manière contraire à la règle de l'entropie [Ibid.].

Et à laquelle il ajoutera par ailleurs :

La différence principale entre la vie et la substance inerte est une direction opposée de leur évolution : La substance vivante augmente l'énergie libre de la biosphère (premier principe de la biogéochimie) [Kutznetsov et Bolshakov, 2013].

Pour conclure ainsi :

Ainsi, la vie se tient presque à l'écart dans l'énergétique de l'Univers, en diminuant et n'augmentant point l'entropie de celle-ci [Vernadsky, 1930:23]

Les deux principes biogéochimiques de Vernadsky (et leur formulation complémentaire) font spécifiquement référence aux fonctions différenciées de la Biosphère et de l'Ecosphère.

Observons que notre auteur cite dans ces principes *l'énergie géochimique biogène* et non *l'énergie biogéochimique* spécifique aux organismes « vivants ». Nous reviendrons en profondeur sur la différence, vitale, de ces deux concepts.

Celle-ci met le doigt sur différence entre les organismes et la formation de leurs « milieux » (habitats), sans lesquels ils ne pourraient se développer.

Précisément sur le fait qu'au long des innombrables cycles (biogéochimiques) de vie et de mort des organismes vivants, les « sous-produits » de leur activité, les matières *biogènes* (oxygène libre, eau libre, minéraux oxydés, corps organiques morts,...) et leur énergie *géochimique biogène*, se sont sans cesse accumulés.

Et que ce cumul cyclique a en retour sans cesse intensifié la génération des organismes et de leur énergie *biogéochimique* spécifique, jusqu'à ce que ces deux formes d'énergie remplissent les compartiments thermodynamiques de la Biosphère, chacun à leur place.

Ceci s'étant produit en deux temps principaux.

Premier temps (premier principe) : La production par les procaryotes (archées et bactéries primitives), au sein de la seule Biosphère (nommée « domaine » du vivant par

Vernadsky), de la matière biogène de ses compartiments (atmosphère, eau de mer liquide, minéraux vadoses), et en contrepartie le stockage profond du carbone d'origine organique issu de la réduction des masses originelles de procaryotes ayant envahi la Biosphère.

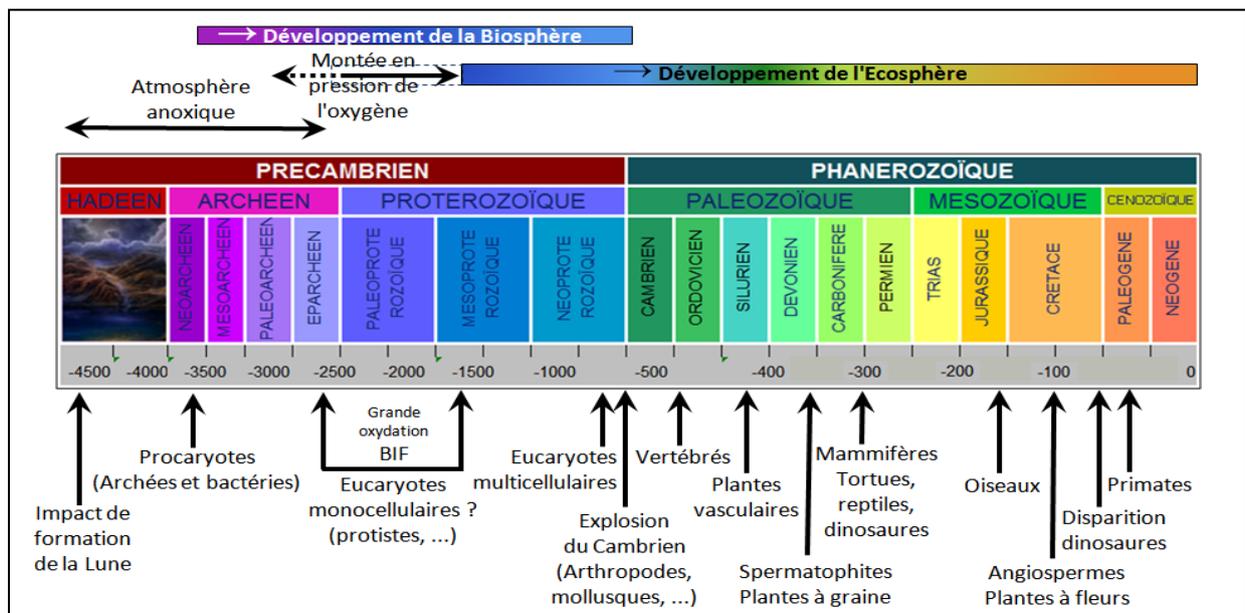
Le premier principe aurait ainsi vocation à traduire la directionnalité des fonctions vitales de la « matière vivante »<sup>120</sup> au sein de la Biosphère.

Second temps (second principe) : Après la grande « aromorphose » et l'apparition des eucaryotes (endosymbiose), la production par ces derniers au sein de l'Ecosphère (nommée « maison » du vivant par Vernadsky), des stocks d'énergie *géochimique* (matières biogène) et *biogéochimique* (organismes vivants, notamment les eucaryotes autotrophes - les plantes marines et terrestres) propices à l'évolution des espèces.

Le second principe aurait ainsi vocation à traduire la directionnalité des fonctions vitales des « organismes vivants » au sein des écosystèmes et biogécénoses de l'Ecosphère<sup>121</sup>.

Le développement des deux sphères aurait ainsi eu lieu selon une succession temporelle que nous avons schématisée de la manière suivante :

Figure 13 : Les deux principes biogéochimiques et la différenciation Biosphère/Ecosphère



Source : Loiret, 2013a. Les valeurs sont en millions d'années.

<sup>120</sup> Vernadsky passe sans cesse du concept de matière vivante à celui d'organisme vivant, sans que leur distinction soit vraiment explicite. Dans nos travaux préliminaires (Loiret, 2012a, 2013a) nous avons pu clarifier cette distinction grâce à la théorie de l'endosymbiose de Lynn Margulis (1986), qui a montré comment les eucaryotes autotrophes ont internalisées les fonctions de réduction et d'oxydation anciennement distinctes et spécialisées chez les archées et bactéries primitives (procaryotes). A partir de quoi nous avons classés les procaryotes (qui se développaient indistinctement au Précambrien en forme d'écume ou de mousse réductrice à la surface de la Terre), dans la catégorie « matière vivante » ; tous les eucaryotes, dont les premiers protistes, formant depuis des « organismes vivants », caractérisés par une autonomie de plus en plus importante.

<sup>121</sup> Il traduit aussi très fortement ce principe énoncé par Lotka (1922a) : « Il a été souligné par Boltzmann que l'objet fondamental de discordance dans la lutte pour la vie, dans l'évolution du monde organique, est l'énergie utile. En accord avec cette observation est le principe que, dans la lutte pour l'existence, l'avantage doit aller à ceux des organismes dont les outils de capture de l'énergie sont les plus efficaces à diriger l'énergie utile dans des canaux favorables à la préservation de l'espèce. »

Ces deux principes énoncent donc ensemble, à l'opposé du concept d'« usure » de la matière, qui sera formulé 40 ans plus tard par Nicolas Georgescu-Roegen (1979)<sup>122</sup>, le principe de « production » de cette matière (vivante et biogène), par les organismes vivants et leurs complices procaryotes.

Ils nous expliquent l'origine de la *distance à l'équilibre* du vivant, de la matière biogène et des champs thermodynamiques de la Biosphère.

Comme le précisait Vernadsky, juste après l'énoncé de ses deux principes :

Les organismes constituent des systèmes autonomes qui dans le milieu cosmique se créent des volumes (champs thermodynamiques) dont la température et la pression leur sont particulières, les distinguent de leur milieu [Ibid.:12].

Notons encore une fois ces trois indicateurs d'état des champs thermodynamiques des organismes et de la Biosphère : volume, pression, température. Ils deviendront cruciaux dans la suite et la fin de notre quête d'une mesure du vivant.

Ensemble, les deux principes répondaient ainsi à la question probablement la plus centrale qui a parcouru, comme nous l'avons vu, la biologie, la physique classique et la thermodynamique d'équilibre depuis la fin du XIXe siècle.

En introduisant la nouvelle forme d'énergie qu'ils manifestent, l'énergie *biogéochimique* et son sous produit, l'énergie *géochimique biogène*, ils bouclent ainsi notre rapprochement entre l'école russe de la directionnalité et les hypothèses (américaines) de Lotka<sup>123</sup>.

Pour nous ramener finalement à ce fameux *cycle idéal d'accumulation énergétique* de Podolinsky, vérifié tout aussi bien ces derniers temps par des biogéochimistes américains que russes.

### 2.1.7 Cycle idéal de Carnot et *accumulation énergétique*

Que ce soit dans la foulée de Hutchinson et des frères Odum aux Etats Unis, ou à la suite de Vernadsky et son école en Russie, la biogéochimie a poursuivi son chemin entamé en 1922 pour irriguer aujourd'hui les recherches les plus évoluées concernant la reconnaissance des caractères fonctionnels du vivant ; que ce soit sur notre planète, ou pour rechercher des planètes de notre galaxie qui seraient « habitables » par le vivant.

Les biogéochimistes américains, qu'ils soient universitaires ou de la NASA, auraient plutôt travaillé sur l'émergence de la Biosphère en centrant leur attention sur les cycles biogéochimiques producteurs de l'atmosphère originelle.

Les biogéochimistes russes, comme nous l'avons vu très sensibles à la pédologie et la géochimie, auraient plutôt travaillé sur l'émergence de l'Ecosphère, en concentrant leur attention sur les cycles biotiques de la lithosphère.

Ils ont cependant tous mis en évidence les fonctions redox du vivant comme condition primitive à tout développement de la vie, et condition essentielle de fonctionnement de ce *cycle idéal d'accumulation énergétique* que Podolinsky avait primitivement identifié, quoiqu'en l'attribuant pour son malheur à la seule action de *l'homme machine parfaite*.

<sup>122</sup> Qu'il nommera lui-même « Quatrième principe de la thermodynamique ».

<sup>123</sup> Nous laisserons maintenant à notre lecteur le soin de se faire sa propre idée de leur véritable origine.

Nous citerons deux exemples des recherches très actuelles concernant les cycles biogéochimiques, le premier participant des fonctions redox originelles de la Biosphère, le second des fonctions redox aujourd'hui prépondérantes de l'Ecosphère (cf. figure 13).

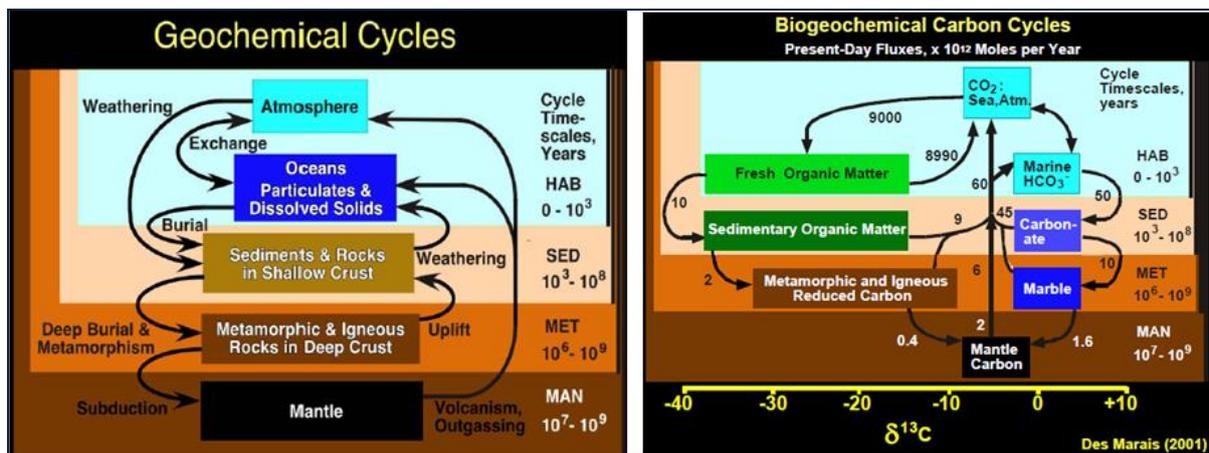
Ils illustrent chacun, un des deux principes biogéochimiques.

### 2.1.7.1 *L'accumulation primitive du Capital, naturel*: Cycles biotiques et fonctions redox originelles de la Biosphère

Parmi les recherches effectuées aux USA, souvent étendues à des coopérations internationales, les travaux de David J. Des Marais (2003, 2008), de Kevin Zahnle et de leurs collègues (Zahnle et autres, 2010), du *NASA Ames Research Center*, nous semblent particulièrement pertinents. Ils reflètent une *histoire redox* d'émergence de l'atmosphère primitive directement corrélée à une « accumulation primitive du Capital naturel ».

Un premier schéma (Des Marais, 2008), nous donne le modèle général d'accumulation énergétique traversant toutes les couches de la Biosphère, tel qu'il aurait eu lieu au Précambrien (cf. figure 13) avant l'apparition de la photosynthèse oxygénée :

Figure 14 : Cycles biogéochimiques d'accumulation primitive de l'énergie

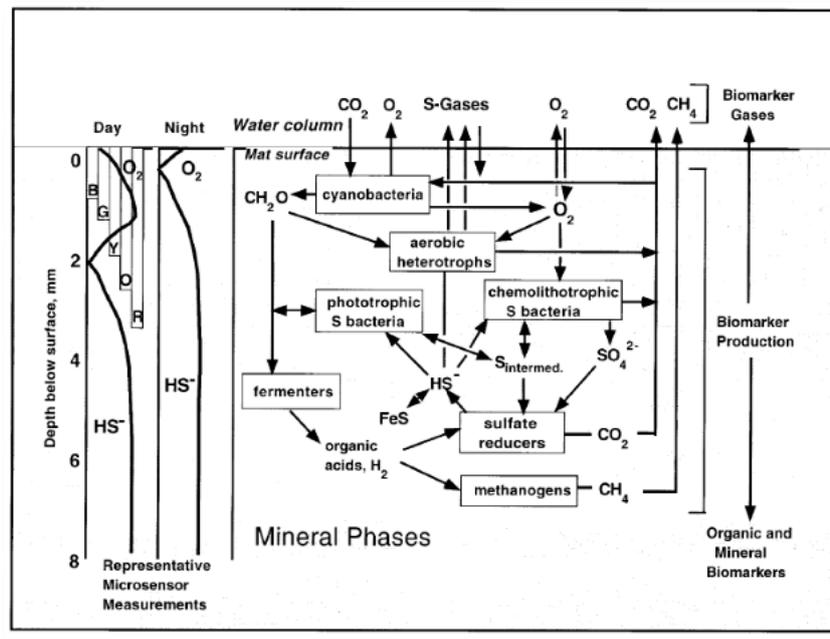


Source : Des Marais, 2008

Un second schéma illustre par un zoom sur l'écosystème microbien primitif, les *fonctions redox* des archées et bactéries qui auraient accomplie cette accumulation primitive de la Biosphère; fonction redox qui était alors, avant l'*endosymbiose* (Margulis, 1986), accomplie séparativement par des bactéries spécialisées.

Des Marais (2003) a ainsi rendu compte des processus de fonctionnement du microcosme primitif, tels qu'on en trouve encore des témoins dans les tapis microbiens des milieux hypersalins, à l'exemple de la Mer morte.

Figure 15 : Ecosystème microbien hypersalin (bio-film) illustrant l'évolution primitive de la Biosphère



Source : Des Marais, 2003

Sur ce schéma le *microcosme primitif*<sup>124</sup> assume séparativement la fonction redox à partir des multiples espèces de bactéries (procaryotes) rassemblées en son tout « homogène » : la fonction autotrophe principale de réduction du CO<sub>2</sub>, et la fonction hétérotrophe principale d'oxydation.

Fonctions inverses dont nous représenterons plus loin le processus simplifié dans nos tableaux 4 (oxydation) et 5 (réduction).

Ceci quand les eucaryotes autotrophes, après l'endosymbiose, assumeront globalement cette fonction redox à partir de leur cytoplasme cellulaire (figure 17).

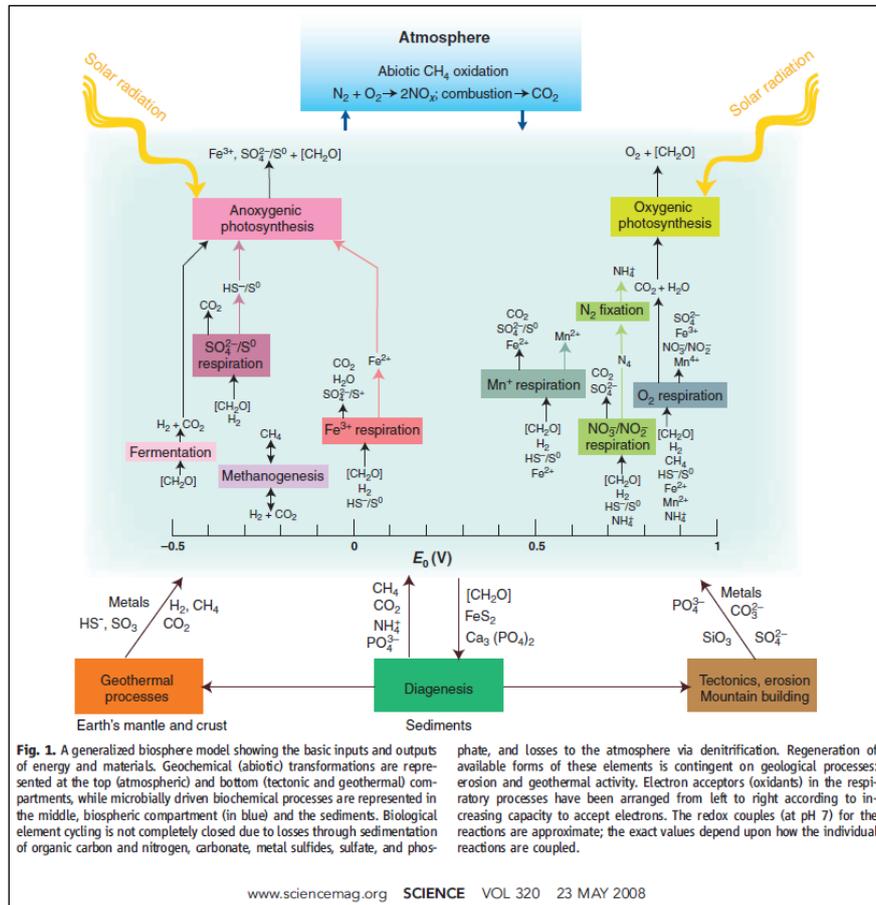
Ramené à l'échelle planétaire, c'est en produisant ainsi des quantités infinies de réactions élémentaires de réduction du CO<sub>2</sub>, de H<sub>2</sub>O, ... (autres gaz de l'atmosphère primitive, métaux en suspension dans l'eau de mer, ...) que la partie autotrophe du microcosme, au long de son expansion de près de deux milliards d'années, a complètement nettoyé et détoxifié l'atmosphère et l'hydrosphère anoxiques de la croûte terrestre primitive pour produire l'atmosphère et l'hydrosphère actuelles, en diffusant par ailleurs l'oxygène atmosphérique en excès dans l'eau de mer et dans les milieux terrestres (puits de O<sub>2</sub>); ceci tout en stabilisant l'effet de serre et la température moyenne de l'atmosphère (à 15°C en moyenne), ce qui par contre coup aura stabilisé la phase liquide de l'eau de mer.

Processus globaux sans lesquels la surface terrestre serait aujourd'hui entièrement gelée, à une température moyenne d'environ -83 °C.

Toutes fonctions originelles des cycles biogéochimiques de la matière vivante de la Biosphère, qu'un autre biogéochimiste américain, Paul Falkowski, membre de l'Académie des sciences des USA, résume avec ses coauteurs dans le schéma suivant :

<sup>124</sup> Nom donné par Margulis (1986) au tapis microbien primitif, qui aurait agi comme un ensemble homogène organisé à l'échelle planétaire.

Figure 16 : Modèle généralisé des transformations biogéochimiques de la Biosphère



Source : Falkowski et autres, 2008

C'est la coordination de ces fonctions très multiples et complexes de réduction et d'oxydation au sein du *microcosme* vu comme un même « organisme global », serait-il constitué par quantité d'espèces différentes, que nous pourrions caractériser comme une *fonction redox de la matière vivante* (de la Biosphère).

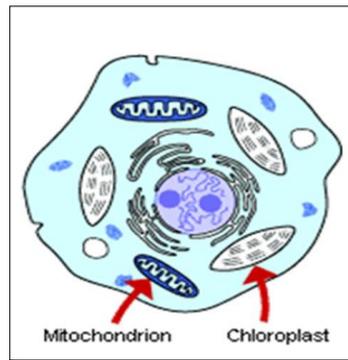
### 2.1.7.2 Cycles biotiques redox de l'Ecosphère (BMC) et systèmes « clos » d'accumulation énergétique

Ceci quand dans l'Ecosphère, il s'agira d'une *fonction redox des organismes vivants*.

Après l'*endosymbiose*, on retrouve en effet cette fonction incorporée comme un tout fonctionnel dans les organismes vivants à toutes les échelles de l'Ecosphère.

Depuis la cellule élémentaire d'un eucaryote autotrophe, composée dans son cytoplasme de chloroplastes (réduction) « et » de mitochondries (oxydation), fonctionnant en parfaite synergie, et dont la régulation est d'évidence assurée par le « système d'information » du noyau cellulaire.

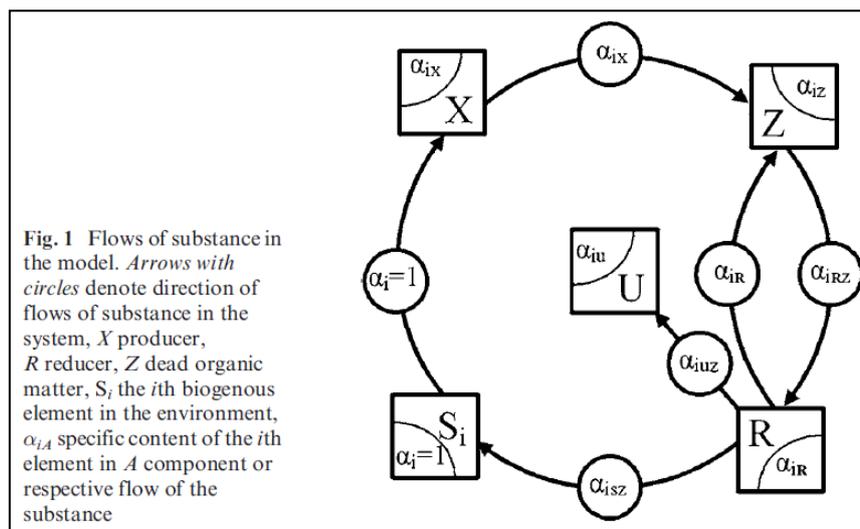
Figure 17 : Fonction redox d'une cellule d'eucaryote autotrophe



Jusqu'aux grands processus redox des biogéocénoses de l'Ecosphère.

Deux chercheurs russes, Gubanov et Degermendzhy (2008), de l'école de Vernadsky, ont modélisé quant à eux la dynamique du *cycle biotique de la matière* (Biotic Matter Cycle, BMC). Les biogéocénoses de l'Ecosphère évolueraient ainsi, grâce au recyclage interne de la matière biogène, selon une dimension systémique que nos chercheurs désignent par le concept de système « clos ».

Figure 18 : Eléments de modélisation du Biotic Matter Cycle (BMC)



Source : Gubanov et Degermendzhy, 2008

Le BMC dirigerait progressivement les biogéocénoses vers une « clôture thermodynamique » (une version thermodynamique des successions vers le climax, de Clements) qui serait selon ces auteurs le plus important des attributs d'existence de la Biosphère.

Un attribut qui illustrerait tout particulièrement l'application du second principe biogéochimique.

Le BMC, qui regroupe en son sein les différents cycles biogéochimiques (eau, azote, carbone, ...), décrit un cycle global d'utilisation et de recyclage des matières vivantes et biogènes au sein des biogéocénoses.

Cycle au long duquel les fonctions de réduction (organismes autotrophes dit producteurs -  $X$  dans le schéma) & d'oxydation (organismes hétérotrophes dits réducteurs -  $R$  dans le schéma), se combinent dans une fonction « redox » optimisant le recyclage des

éléments biogènes (S dans le schéma), et intensifiant la production d'énergie géochimique biogène (matière organique inerte, en voie de subduction, Z dans le schéma).

Au point qu'une biogéocénose atteignant la clôture serait complètement autonome.

Et cycle au bout duquel la matière organique non biodégradable (le carbone organique réduit impropre à la consommation) est stockée aux frontières de la biogéocénose (donc aux frontières de l'Ecosphère), sous la forme d'une biomasse de plus en plus inerte que nos auteurs nomment « Deadlock » (U dans le schéma).

Sachant par ailleurs que cette Deadlock (en français : impasse ou cul-de-sac, soit une forme de matière organique « sans retour »), une fois sortie de l'Ecosphère et passée dans la Biosphère, connaîtra par la suite un processus complémentaire de subduction/réduction qui au long des millénaires constituera les stocks d'énergie fossile et les stabilisera toujours plus, jusqu'à la forme définitive du graphite ou du diamant.

Tous stocks qui à leur tour, à l'échelle planétaire, « stabiliseront » la distance à l'équilibre de la Biosphère.

Ce qui nous explique à l'échelle globale le processus, ici propre à la lithosphère<sup>125</sup> (au sein de l'Ecosphère), partie de la fonction d'*accumulation énergétique* de la Biosphère, par lequel ses compartiments thermodynamiques furent progressivement stabilisés.

D'où l'importance effective des BMC, qui regroupent nombre de significations fondamentales :

- Ils explicitent cette direction de l'évolution selon laquelle une aromorphose exogène, version thermodynamique des *successions* vers le climax, intervient au sein des biogéocénoses en complément de l'aromorphose endogène des organismes, pour optimiser la production d'énergie biogéochimique et stabiliser l'écosystème.

- Ils décrivent en détail le processus d'accumulation énergétique que Vernadsky opposait au principe de Carnot/Clausius :

Dans leur ensemble, les animaux et les végétaux, dans toute la Nature vivante, présentent un phénomène naturel, contraire au principe de Carnot, comme il est généralement formulé. Il y a généralement un accroissement d'énergie active dans l'écorce terrestre comme une suite générale de la vie, de toutes ses manifestations. [Vernadsky, 1924:337].

- Ils illustrent le rôle essentiel que joue au sein de ce processus la synergie des fonctions « redox », qui combinent « intimement » productions néguentropiques et entropiques de telle manière à maximaliser le cumul d'énergie.

- Ils caractérisent l'émergence des champs thermodynamiques et des structures dissipatives « vivantes » de l'Ecosphère, où la notion de clôture met en relief le processus cyclique par lequel matière et énergie sortant sont « réincorporées » (recyclées) au sein de l'écosystème avec de plus en plus d'efficacité au cours du temps, au prorata de l'expansion du réseau trophique (feedback positifs) ; ceci générant, depuis les bactéries élémentaires de la Biosphère jusqu'aux organismes et écosystèmes constitués de l'Ecosphère, la production de champs thermodynamiques de plus en plus élargis, en même temps que pourvus de frontières bien délimitées (clos).

---

<sup>125</sup> Aux Etats Unis, Falkowsky (2008, 2009), lui-même biogéochimiste, a décrit la forme des BMC correspondant à l'hydrosphère, toujours au sein de l'Ecosphère.

Au point que le système, très ouvert à ses débuts, se referme progressivement, en devenant de plus en plus autonome et intensif en énergie biogéochimique, toujours plus loin de l'équilibre, et finalement plus efficace en termes de développement interne de la biodiversité.

- Ils signifient et caractérisent cette « fertilité naturelle » sur laquelle les Physiocrates avaient tant insisté, mais que Liebig avait « ridiculisée », ceci en stricte opposition à sa loi des rendements décroissants, qui n'apparaît ainsi valide qu'au sein de l'Anthroposphère.

Ce en quoi les BMC nous montrent la grande différence entre le système « isolé » (qui ne reçoit que de l'énergie), par lequel nombre de physiciens caractérisent la Biosphère, et le système « clos » (qui originellement a échangé beaucoup d'énergie et de matière, et qui devient par la suite de plus en plus autonome).

Les systèmes clos se caractériseraient ainsi selon Gubanov et Degermendzhy (2008) par les deux critères de (niveau de) clôture et d'intensité énergétique ; ce qui serait aussi le cas de la Biosphère (ou pour le moins de l'Ecosphère).

Pour nos auteurs, de tels systèmes, une fois « stabilisés », peuvent perdurer dans cet état pendant des millénaires.

## 2.1.8 Conclusion : Vers un *quatrième principe*

### 2.1.8.1 L'accumulation énergétique vérifiée

La théorie de Podolinsky postulait l'existence, au niveau de l'Anthroposphère, d'un principe d'accumulation énergétique, qui fut mis en cause par Engels au titre notamment du second principe de la thermodynamique.

Nous formulons dans nos objectifs de résolution de la première composante de notre problématique, la quête d'un principe cumulatif de l'énergie d'une évidence telle qu'il serait opposable au second principe et répondrait aux arguments d'Engels.

Tout au bout de notre reconstitution historique des évolutions de la recherche qui suivirent cette théorie de Podolinsky, nous avons pu, en recollant bout à bout nombre des morceaux d'une même quête éparpillés par l'histoire mouvementée du XXe siècle, la vérifier aux niveaux les plus étendus de la Biosphère et de l'Ecosphère.

Elle va ouvrir sur le champ problématique nouveau de la mise au point d'un *système de mesure* de cette accumulation énergétique, et avec lui sur la deuxième composante de notre problématique globale : la mesure de l'énergie biogéochimique du vivant comme fonction première de la biodiversité, qui seule permettrait une mesure *biophysique* de nos actifs écologiques.

Avant même de pénétrer les strates de cette problématique, qui constitue la partie la plus « vitale » des enjeux de notre thèse, il nous semble cependant important d'établir comme une synthèse des apports de cette section et des grandes questions qui y furent abordées, comme autant de jalons marquant les étapes importantes de notre recherche.

Les principes biogéochimiques de Vernadsky ont rendu compte des notions d'entropie positive et négative de Clausius, mais en même temps se sont révélés strictement opposables à la conclusion « universelle » que ce dernier tirait de leur bilan thermodynamique.

Ce qui distingue clairement les notions développées par Clausius, dont l'existence apparaît indéniable, de la conclusion qu'il en tira, qui ignore l'exception du vivant.

Au point que nous pouvons maintenant nous essayer à revenir sur cette question de Lotka et Vernadsky, partout présente en filigrane dans leurs travaux.

### 2.1.8.2 Quid d'un quatrième principe ?

Puisque le troisième est aujourd'hui vérifié !

Ce quatrième principe avait été « évoqué » dès 1922 par Vernadsky dans l'un de ses conférences de la Sorbonne :

Dans les phénomènes de la biosphère, par le fait de l'existence de la vie, l'entropie de l'Univers devrait diminuer et non s'augmenter. Cette observation a donné lieu à de nouvelles spéculations. Un physicien allemand, B. Auerbach y a vu l'expression d'un nouveau principe, contraire à l'entropie [Vernadsky, 1924:337-338].

Nous verrons au paragraphe suivant la première formulation qu'il en donna, avant d'aboutir progressivement à ses deux principes biogéochimiques. Ce qui caractérise bien chez Vernadsky (1924, 1929, 1930) une quête ininterrompue d'expression de ce quatrième principe, qui devait pour lui comporter deux parties, relatives à la Biosphère et à l'Ecosphère.

Quant à Lotka, cette question nous mène enfin à son second article de cette même année 1922 : *Natural selection as a physical principle* (Lotka, 1922b), qui se révéla ainsi tout à fait particulière.

Il y prolongeait sa réflexion sur l'énergétique de l'évolution et nous disait en substance que le principe de sélection naturelle énoncé dans son article précédent (Lotka, 1922a, cf. paragraphe 2.1.3.) se révélait capable de produire une « information » que les deux lois de la thermodynamique étaient incapables de fournir, celles-ci étant insuffisantes à déterminer le cours des événements dans un système physique.

Ces lois nous disent que certaines choses ne peuvent arriver mais ne nous disent pas ce qui arrive. Et dans la liberté ainsi laissée, certains auteurs, comme Sir Oliver Lodge, ont vu l'opportunité de l'interférence d'une « guidance » de la vie en tant qu'*esprit*<sup>126</sup> dans l'histoire des systèmes physiques ; ceci quand un H. Guillemot<sup>127</sup>, s'il a vu l'intervention de la vie sur les systèmes physiques, ce ne fut qu'en substituant des choix (un libre arbitre) à cette *guidance*.

Entre la doctrine « vitaliste » d'une intervention de l'esprit sur la matière, et la doctrine nihiliste et/ou hasardeuse de la thermodynamique, Lotka, s'appuyant sur Guillemot, faisait ainsi intervenir un tiers, à savoir la capacité de *choix* des êtres vivants, qui aura supposé une information d'autant plus structurée que ces choix étaient performants dans la production d'énergie utile et de distance à l'équilibre.

Ce sur quoi il en arrivait au fond de son article :

Ainsi, que la vie soit présente ou non requiert quelque chose de plus que la première et la seconde loi pour le déterminer ; *quelque chose* de défini *doit arriver*, la course des événements est déterminée, quoique pas en termes de la première et de la seconde loi seulement. La « liberté » selon laquelle les organismes vivants se développent *sous les lois de la thermodynamique* n'est pas une liberté en fait, mais

<sup>126</sup> Cet auteur avait fait une étude approfondie du spiritisme, très en vogue à l'époque.

<sup>127</sup> Il faisait ici référence à son livre de 1919, *La matière et la vie*, que nous n'avons pu obtenir, mais qui à priori aurait fait ressortir, comme nous allons le voir plus bas, le concept *d'information*, au delà de la thermodynamique classique.

une fallacieuse liberté provenant d'une formulation incomplète des lois physiques applicables au cas. La force du principe de Carnot est aussi sa faiblesse : il reste vrai indépendamment du mécanisme particulier ou de la configuration du transformeur d'énergie (engin) auquel il est appliqué ; mais, pour cette raison il est aussi incompétent à rendre une information essentielle concernant l'influence du mécanisme sur la course des événements. Dans le cas *idéal* d'un engin calorifique réversible, l'efficacité est indépendante du mécanisme. Les phénomènes *réels* sont irréversibles ; et, en particulier, l'*action de déclenchement*, qui joue un rôle si important dans les processus vivants, est un processus typiquement irréversible, la libération d'énergie utile à partir d'un « faux » équilibre. Ici le mécanisme est fondamental. Se confronter avec les problèmes présentés dans ces cas requiert de nouvelles méthodes, requiert l'introduction, dans l'argumentation, de nouveaux principes. Et un principe capable d'étendre notre connaissance systématique dans ce champ semble devoir être trouvé dans le principe de la sélection naturelle, le principe de survie du plus fort, ou, pour parler en termes libérés d'implication biologique, le principe d'une persistance des formes stables [...] Dans les systèmes évoluant vers un « vrai » équilibre (comme les systèmes thermiquement et mécaniquement isolés, ou les systèmes isothermes de la chimie physique), la première et la seconde loi de la thermodynamique suffisent à déterminer à n'importe quel niveau l'état final [...] Mais les systèmes recevant une fourniture stable d'énergie utile (comme la terre illuminée par le soleil), et évoluant, non pas vers un vrai équilibre, mais (probablement) vers un état stationnaire, les lois de la thermodynamique ne sont plus suffisantes à déterminer l'état final [...] Que le principe de sélection soit compétent à donner de l'information au delà du champ d'application des lois de la thermodynamique a été très clairement exposé par H. Guillemot. Le présent auteur a depuis longtemps intégré le fait que ce principe est capable d'une telle application ; et qu'il fonctionne comme s'il était une troisième loi de la thermodynamique (ou une quatrième, si la troisième place doit être donnée au principe de Nernst) [Lotka, 1922b, p. 2-3/4].

Lotka introduisait ainsi très explicitement la nécessité d'un *quatrième principe* de la thermodynamique, que l'on devrait trouver dans la sélection naturelle.

Il ferait pour lui référence, non plus aux systèmes isolés se rapprochant de l'équilibre, mais à *la persistance des formes stables*, soit aux processus irréversibles des systèmes ouverts qui conduisent leur état stationnaire loin de l'équilibre, par apport continu d'énergie libre provenant de l'extérieur<sup>128</sup>.

Mais au delà des systèmes ouverts et des structures dissipatives, qui peuvent être représentés par des perturbations climatiques ne mettant en œuvre que de la matière

---

<sup>128</sup> Après que Lotka ait signifié ce concept d'état stable introduit par Clements (1916), il faudra encore vingt ans pour que Von Bertalanffy formalise en 1942 (référence non disponible, mais citée par Von Bertalanffy, 1968:146) cette tendance vers l'état stable des systèmes ouverts, et encore quatre ans avant que Prigogine (1946) ne paraisse caractériser cet état stable par *le minimum de production d'entropie* (le fameux « théorème de Prigogine »). Cependant Von Bertalanffy a explicitement formulé que l'entropie minimale de Prigogine, repris par Georgescu-Roegen sous le terme de « basse entropie » (cf. notre longue citation au paragraphe A : *Une interrogation centrale*) n'était pas un critère thermodynamique permettant de définir l'état stable des systèmes ouverts (Von Bertalanffy, 1968:155). Il conclura ce sujet comme un problème non résolu : « Nous ne possédons actuellement aucune loi physique qui énonce que dans une « soupe » de composés organiques il se forme des systèmes ouverts s'auto-maintenant dans un état hautement improbable. Même si on accepte de tels systèmes comme des « données » il n'existe aucune loi physique pour affirmer que leur évolution se fera vers une plus grande organisation, c'est à dire vers l'improbable » (Ibid. :157). Ce qui nous signifie plusieurs choses à la fois : (a) Que Von Bertalanffy, quoiqu'il se soit inspiré de Lotka (cité dans sa bibliographie) n'avait pas lu Vernadsky (b) Que ce quatrième principe serait bien le plus important de la physique après celui de Carnot/Clausius (c) Que l'expression de ce quatrième principe, quoique recherchée tout au long du XXe siècle, y compris par les fondateurs de la Physique quantique, et quoiqu'en ait cru Prigogine, ainsi que Georgescu-Roegen, qui pensait lui aussi l'avoir exprimé (Georgescu-Roegen, 1971,1979), n'est toujours pas acquise (d) Que Von Bertalanffy, en 1968, l'appelait encore de ses vœux, à la suite donc de Lotka (e) Que la *direction de l'évolution* est bien cette loi physique et thermodynamique générale recherchée qui affirmera que l'évolution se fera vers une plus grande organisation, quelle que soit sa haute improbabilité. Sa seule différence avec celle de Clausius étant le solde final des « deux sens » de la transformation, ce qui se vérifie « physiquement » par la totalité de la biomasse présente dans la Biosphère superficielle et profonde.

inerte ou biogène, Lotka insistait sur l'apparition de la vie, faisant ainsi particulièrement référence aux organismes vivants.

Prenant acte de cette direction de l'évolution établie dans son article précédent, Lotka pénétrait pour sa part directement la question de l'évolution des espèces, sans aborder (approfondir) au préalable la question sous tendue de l'accumulation énergétique.

Direction « accumulative » que Vernadsky avait comme nous l'avons vu clairement structurée en deux phases distinctes de l'évolution, que traduisaient ses deux principes, la Biosphère primitive des procaryotes, et l'Ecosphère des eucaryotes.

Ainsi le quatrième principe selon Lotka doit être vu comme essentiellement relatif à la distance à l'équilibre et à la stabilisation des *organismes vivants*, soit le second principe biogéochimique de Vernadsky.

Comme en témoignent les points communs, entre ces mots de Lotka :

Et un principe capable d'étendre notre connaissance systématique dans ce champ semble devoir être trouvé dans le principe de la sélection naturelle, le principe de survie du plus fort, ou, pour parler en termes libérés d'implication biologique, le principe d'une persistance des formes stables [Ibid.].

Et le second principe de Vernadsky :

Lors de l'évolution des espèces, ce sont les organismes augmentant par leur vie l'énergie géochimique biogène qui survivent [Vernadsky, 1930:12].

Le quatrième principe de Lotka est donc moins « universel », mais nous verrons cependant plus loin qu'il abordait avec lui la notion d'information, « à priori » absente chez Vernadsky.

Tentons maintenant une première expression synthétique et très générale de ce *quatrième principe* au sortir de la présente section.

Il serait celui de l'accumulation d'exergie au long de l'évolution des espèces, constatée par *les deux principes biogéochimiques*, qui établissent explicitement l'exception du vivant au sein de la Biosphère.

Il exprimerait globalement que, étant constatée l'existence d'un double sens des transformations et changements d'état se produisant dans l'univers (transformations à entropie positive et négative selon Clausius, cf. paragraphe 2.1.6.4.), la Biosphère et la vie manifestent par leur entière présence l'existence d'un solde de ces transformations allant à « contresens » de la conclusion de Clausius :

Si dans tous les changements d'état qui se produisent dans l'univers, les transformations effectuées dans un certain sens surpassent celles qui se produisent en sens contraire, il faut que l'état de l'univers se modifie de plus en plus dans le premier sens, c'est à dire qu'il tende de manière continue vers un état limite [Clausius, 1865].

Ce qui supposerait avant tout de constater le principe d'expression du double sens de ces transformations dans l'indissociable complémentarité dissipation/incorporation d'énergie libre des fonctions *redox* de régulation des organismes et des biogéocénoses.

Une fonction que Gubanov et Degermendzhy avaient vérifiée avec les BMC.

Ce principe induirait que l'apparition des *eucaryotes hétérotrophes* (notamment les animaux) dans la chaîne de l'évolution, quelle que soit leur propension *dissipative* (comme la simple respiration), n'a pas toujours produit de solde positif en termes d'entropie.

Il montrerait ainsi, aux différentes échelles d'observation du vivant (de la cellule à l'Ecosphère, vue comme la somme des *biogéocénoses* planétaires), que le solde différentiel entre stockage d'énergie libre et flux dissipatifs a forcément « été » positif à un moment de

l'histoire de notre planète, au regard notamment de la distance à l'équilibre cumulée de la Biosphère, et « pourrait l'être » encore.

L'établissement d'un bilan thermodynamique ferait ainsi apparaître que, à la différence de ce qu'en disent Clausius et Prigogine, il y a des cas, plus que fréquents dans la Biosphère et l'Écosphère, où *la variation d'entropie est négative !*

La question devenant de savoir quel référentiel nous adoptons pour mesurer cette variation (l'Univers entier ou la seule Biosphère, ou encore cette dernière face à l'Univers)!

Cette mesure deviendrait le seul moyen d'expliquer *la distance à l'équilibre thermodynamique de la Biosphère et de l'Écosphère* (somme des biogéocénoses), et leur « production de matière vivante », de très loin antérieure aux principes de la thermodynamique, qui ne peut résulter que d'une variation négative de l'entropie planétaire sur de très longues distances temporelles<sup>129</sup> !

Ce qui est en soi conforme avec toutes les observations historiques de la biologie, et surtout de la biogéochimie, qui, en même temps que la grande *synthèse évolutionnaire*, « rendait compte », à partir des mêmes auteurs (russes), de la formation de la Biosphère et de l'Écosphère !

Au bout de quoi se pose la question d'un outil de vérification de cet éventuel quatrième principe, qui établirait le bilan global des entrées/sorties planétaires d'entropie, cumulé de territoire en territoire.

Ce bilan peut être regardé comme un de nos objectifs principaux.

### **2.1.8.3 Sauf l'Anthroposphère !**

Ce bilan pose notamment la question de l'homme vis à vis de cet éventuel quatrième principe.

Vernadsky avait ainsi formulé primitivement le quatrième principe avant de nous fournir les bases de son développement (ses deux principes biogéochimiques) :

Dans leur ensemble, les animaux et les végétaux, dans toute la Nature vivante, présentent un phénomène naturel, contraire au principe de Carnot, comme il est généralement formulé. Il y a généralement un accroissement d'énergie active dans l'écorce terrestre comme une suite générale de la vie, de toutes ses manifestations. Dans les phénomènes de la biosphère, par le fait de l'existence de la vie, l'entropie de l'Univers devrait diminuer et non s'augmenter [Vernadsky, 1924:337].

Formulation qui n'était donc rien d'autre (façon de parler) que l'extension à l'ensemble de la Biosphère de la théorie de Podolinsky.

Et formulation dans laquelle Vernadsky, « à priori », incluait l'animal humain, comme semble le préciser son « Dans leur ensemble ... » !

Ce nouveau principe (de synthèse, après les principes biogéochimiques) faisait en effet apparaître, comme nous l'avons déjà souligné, que la production néguentropique des autotrophes et la production entropique des hétérotrophes intervenaient « de concert » (supposant ainsi une régulation) pour, au final, augmenter l'accumulation énergétique de la Biosphère, dans une direction éloignée de l'équilibre thermodynamique (et donc de l'entropie universelle).

Le règne animal était donc bien partie prenante de la contradiction de Carnot !

---

<sup>129</sup> Au delà de ce phénomène que nous connaissons comme « la grande oxydation ».

Ce qui surprendra plus d'un des adeptes de Prigogine (1946, 1968), qui n'ont cessé après lui d'étendre et fouiller toujours plus avant un second principe généralisé aux systèmes ouverts, et alternatif à une directionalité de l'évolution présentant un douteux caractère « vitaliste ».

Notons au passage que ce ne semble pas être un hasard, quand nous avons vu ce qu'il en était au début du XXe siècle de l'*Ecole de Jena* (paragraphe 2.1.5.1. : *De la « force vitale » à l'énergie biogéochimique*), si c'est une nouvelle Ecole de Jena qui développe aujourd'hui cette tendance. Ce qui nous montre bien que le débat entre Hans Driesch et Wilhelm Roux reste toujours aussi « vital », cent trente ans après !

Comme en témoigne cette publication contemporaine d'Axel Kleidon, provenant de l'*Institut Max Planck pour la Biogéochimie* (Jena, Allemagne) : *Thermodynamics and environmental constraints make the biosphere predictable - A response to Volk* (Kleidon, 2007).

Reprenons l'abstract de cet article, en précisant auparavant que l'on débat aujourd'hui, après Prigogine, autour d'autant d'hypothèses tendant à démontrer que le vivant, soit se développe en suivant une ligne de « Minimal Entropy Production » (MiEP), soit de « Maximal Entropy Production » (MaEP), en français PMiE et PMaE.

Dans sa critique de Kleidon (2004), Tyler Volk conclue que le maximum de production d'entropie (PMaE) n'a pas grande pertinence pour l'évolution biologique et l'histoire temporelle de la vie sur Terre. Je pense que beaucoup de ses points ne sont pas justifiés et reflètent plutôt (a) un manque d'appréciation de l'importance centrale de la production d'entropie comme « monnaie universelle » qui mesure ce qui maintient les systèmes au travail, incluant la biosphère, (b) une mécompréhension de combien l'activité biotique est incorporée dans le budget global d'entropie, et (c) un manque de distinction entre les conditions environnementales optimales qui maximisent la productivité et le résultat des compromis environnementaux versus fonction optimale des organismes à pratiquer quelques compromis internes [...] En résumé, je ne pense pas que Volk ait des arguments convaincants qui contredisent PMaE, quoique j'agréé certainement qu'il y ait une masse de travail supplémentaire pour reconnaître pleinement la grande importance que la thermodynamique et PMaE jouent dans la mise en forme de la biosphère terrestre et son histoire évolutionnaire [Kleidon, 2007].

Les adeptes de Prigogine cherchent donc bien maintenant à reformuler entièrement le concept de Biosphère à partir de la seule entropie !

Ce qui leur donnera dans tous les cas bien du travail supplémentaire !

Cet article étant produit par un *Institut de biogéochimie*, censé « en principe » avoir intégré les principes fondamentaux de la Biosphère, il confirme à quel point l'héritage fondamental de Vernadsky est resté ignoré de la littérature occidentale, où la mesure du désordre, l'entropie, est désormais devenue « la » (seule) mesure (une monnaie « universelle », tout comme Liebig) d'un ordre nouveau formateur de la Biosphère, pensé aux strictes antipodes de son fondateur !

D'où la confusion qui s'ensuit et s'ensuivra encore longtemps, tant que l'on ne reprendra pas « ensemble », et **à partir de 0** (absolu)<sup>130</sup>, les concepts d'entropie positive et négative, qui ensemble, et seulement ensemble (principe redox appliqué à la biologie) incorporeraient l'ordre et le désordre dans une directionalité unique des biogécénoses.

Alors que Clausius, comme nous l'avons vu, l'avait pour sa part pris en compte.

---

<sup>130</sup> Nous faisons ici allusion au troisième principe, de Nernst.

Mais revenons à notre sujet. Nous disions donc que Vernadsky incluait « à priori » l'homme au sein du quatrième principe.

Il nous semble qu'il est apparu progressivement chez lui un grand doute, qui ne cessera de s'amplifier, depuis ses conférences de la Sorbonne jusqu'à sa mort.

C'est la question de l'homme en tant qu'animal !

Est-il inclus ou non dans le quatrième principe ? Et avec lui dans l'Ecosphère ?

C'est « la » question du XXI<sup>e</sup> siècle ! Qu'il se posait dès 1922.

Juste avant et juste après avoir formulé le concept du quatrième principe, il s'était en effet posé la question de *l'activité géochimique de l'humanité*, en forme de fondement à ce qui est devenu aujourd'hui (avec seulement 90 ans de retard !) un concept très en vogue : *L'Anthropocène* !

Il avait commencé avec les émissions de CO<sub>2</sub> (en 1922<sup>131</sup>) :

C'est un fait très important et très caractéristique de l'histoire du carbone, que la quantité de l'acide carbonique ainsi formée par l'humanité devient de plus en plus grande et est d'un ordre qui doit être nécessairement pris en considération dans son histoire géochimique. Ainsi la quantité de l'acide carbonique accumulée dans le cours d'une année par suite de la combustion du charbon de terre s'élevait en 1904, selon les évaluations de A. Krogh à 7 x 10<sup>8</sup> tonnes métriques. C'est déjà 0,05% de toute la masse existante de l'acide carbonique de l'atmosphère. Une telle oscillation devient un phénomène tellurique d'une grande importance. L'homme civilisé déränge l'équilibre établi. C'est une force géologique nouvelle, dont l'importance devient de plus en plus grande dans l'histoire géochimique de tous les éléments chimiques [Vernadsky, 1924:306].

En ajoutant juste après :

Nous verrons que c'est un fait isolé du grand phénomène naturel général [Ibid.].

Puis il avait élargi son constat :

Pour la première fois dans l'histoire de notre planète nous voyons la formation de composés nouveaux, un changement inouï de la face terrestre. Au point de vue géochimique tous ces produits : les masses des métaux libres, comme le fer, le cuivre, l'étain ou le zinc, les masses d'acide carbonique, produits de la calcination de la chaux ou de la combustion du charbon de terre, les quantités énormes d'anhydride sulfureux ou de l'hydrogène sulfuré formés pendant les processus chimiques et métallurgiques et une quantité de plus en plus grande d'autres produits techniques ne se distinguent pas des minéraux. Ils changent le cours éternel des cycles géochimiques [Ibid.:343].

En ajoutant juste après :

Il est clair que ce n'est pas un fait accidentel, qu'il était préformé par toute l'évolution paléontologique. C'est un fait naturel comme les autres... [Ibid.].

Jusqu'à s'interroger :

Où s'arrêtera ce processus, ce fait géologique tout nouveau ? Et s'arrêtera t-il ? [Ibid.].

Pour finir sur un constat d'incertitude anticipant l'*Anthropocène* :

Il est à l'état d'évolution dont l'effet final ne nous est pas encore dévoilé. Mais telle qu'il est déjà et qu'il le deviendra sûrement dans des siècles, c'est un fait qui change tous les cycles réversibles géochimiques de tous les éléments [...] Une force géologique nouvelle est certainement apparue à la surface terrestre avec l'homme [Ibid.:344].

---

<sup>131</sup> Le scientifique suédois Arrhenius avait le premier théorisé l'effet de serre en 1896.

Notons la contradiction des deux citations ajoutées « juste après » les principales. Tantôt il affirme, tantôt il s'interroge. A quelques pages de distance, l'action de l'homme, d'abord isolée du grand phénomène naturel, devenait un fait naturel « comme les autres », mais qu'il remettait aussitôt en question.

Ce qui montrait bien son extrême incertitude à ce sujet, qui le mènera de plus en plus, s'approchant de son retour en Russie, puis y retournant définitivement, à chercher des justifications (et parfois même à se raconter des histoires) quant à la raison exacte, disons mieux la « finalité », ou encore la *direction de l'évolution* ... de la présence de l'homme au sein de la Biosphère.

Tout comme de sa présence à lui, vue la place non négligeable qu'il prendra dans l'avènement de l'*Anthropocène* !

C'est ainsi par exemple que, de plus en plus tiraillé par cette question, il publia vers 1932 un nouvel article, *L'autotrophie de l'humanité* (Vernadsky, 1932).

Il s'y trouvait parfaitement informé de ce qui se déroulait alors dans son pays natal, l'Ukraine<sup>132</sup> (*La tragédie des cinq épis*, Werth, 2011) :

Notre civilisation se trouve toujours sous ce rapport au bord d'un précipice. A l'heure présente des centaines de milliers d'hommes meurent ou languissent en Russie par suite du manque de nourriture, et des millions d'autres - plus de 10-15 millions - y ont été victimes des fautes sociales commises. Jamais la précarité de l'existence humaine ne fut si claire et le spectre de déchéance et de décadence si vivant dans les âmes bouleversées ... [Vernadsky, 1932].

Et nous montrait au passage comment il fut un des très rares individus, au pire moment de la domination stalinienne, à exprimer publiquement (en tous cas au sein du cercle probablement très restreint qui partageait ses écrits, vue l'interdiction de Staline) son opinion du régime.

Il développait ensuite les effets d'un nouveau concept selon lequel l'humanité pourrait être bientôt capable de « synthétiser » la nourriture :

On attend la découverte de cette synthèse et ses grandes conséquences dans la vie se manifesteront immédiatement. Que signifierait une synthèse pareille des aliments dans la vie humaine et la vie de la biosphère ? Par son accomplissement, l'homme se libérerait de la matière vivante. D'un être social hétérotrophe il deviendrait un *être autotrophe*. La répercussion de ce phénomène dans la biosphère doit être immense. Ce fait signifierait la scission du bloc vivant, la création d'un troisième embranchement indépendant de la matière vivante. Par ce fait apparaîtrait dans l'écorce terrestre, et pour la première fois dans l'histoire géologique du Globe, *un animal autotrophe* [Ibid.].

Ceci après avoir présidé la *Commission permanente pour l'étude des ressources naturelles de l'URSS* (figure 7.1). Il était effectivement très troublé (mais qui ne l'aurait été à sa place !).

Dans les années 60 les américains nous avaient promis un tel miracle, à base de pilules (beuh !), pour nous offrir finalement celui de MacDonald.

La chose ne serait « à priori » possible qu'en inventant une feuille « artificielle » reproduisant la photosynthèse. Ce qui est d'ailleurs en cours en cette année 2015<sup>133</sup> !

---

<sup>132</sup> Dont, souvenons-nous il avait créé l'Académie des sciences, et où il avait depuis de nombreuses années (ses débuts avec Dokouchaev, fondateur de la pédologie) impulsé et développé des recherches sur des pratiques agricoles alternatives.

<sup>133</sup> Voir notamment les diverses publications très récentes (2006-2014) de Daniel G. Nocera, inventeur de la « feuille artificielle » : <http://www.pnas.org/search?author1=Daniel+G.+Nocera&sortspec=date&submit=Submit>

Mais ce qui, après une brève « analyse énergétique », nous semble bien n'être que le « rêve » suivant, dans la longue suite des tentatives « d'affranchissement de la nature ».

Comme pour les panneaux solaires et photovoltaïques, on oubliait chaque fois qu'il y avait un principe bizarre, une forme de « loi technologique des rendements décroissants », pas encore nommée ni vraiment développée, selon laquelle le coût « entropique » (et financier) global serait toujours supérieur à l'énergie captée.

En somme le principe de Clausius appliqué tout entier à notre technologie.

Invention qui ne changerait de toute façon absolument rien à la question de l'absorption du CO<sub>2</sub> (puits) et au stockage profond du carbone<sup>134</sup>.

C'était un nouveau « médicament », susceptible pourquoi pas de soigner un symptôme ponctuel, mais certainement pas d'agir sur la cause.

Vernadsky rêvait ainsi d'un affranchissement de la nature qui, de manière étonnante, était devenu pour lui, père de l'*écologie globale*, la seule solution à la catastrophe qui se déroulait devant ses yeux, et à laquelle, « malgré tout », il avait, quoiqu'il en veuille, apporté sa pierre !

Il s'interrogea ainsi jusqu'à sa mort.

Sut-il quelque chose du projet des américains de bombardement nucléaire du Japon, qui avaient informé Staline à ce propos ? N'était-il pas au tout premier rang des personnes propres à partager un tel secret ?

Aurait-il alors entrevue la réponse ?

Juste avant son décès, le 6 janvier 1945, il a écrit à un de ses vieux amis, Alexander Petrunkevitch :

J'attends de l'avenir avec un grand optimisme. Je pense que nous subissons non seulement un changement historique, mais un changement planétaire tout aussi bien. Nous vivons dans une transition vers la Noosphère [Hutchinson, 1970].

C'était peu avant Hiroshima (06/08/1945).

Il n'aurait donc pas été pas au courant !? On dit pourtant qu'il serait mort fou !?

Ainsi sa folie présumée nous désoriente !

Toutes raisons pour lesquelles nous avons précisé plus haut que ce principe étendu d'accumulation énergétique, ou quatrième principe de la thermodynamique, que vérifie la seule existence de la Biosphère, intègre certes oui l'animal, ... mais « sauf l'Anthroposphère », dans son état actuel !

Sob état « actuel » nous laissant supposer que rien n'interdit « à priori » qu'un bilan qui inclurait l'Anthroposphère puisse un jour (re)devenir positif en termes d'accumulation énergétique, ce dont la vérification formera probablement l'enjeu principal du XXI<sup>e</sup> siècle !

Pour cela, il nous faut pouvoir établir, au delà d'une mesure de l'énergie biogéochimique du vivant, vue comme une fonction de la biodiversité, les principes permettant d'estimer le juste impact de l'Anthroposphère sur cette dernière.

Ce qui fait bien partie de nos enjeux.

---

<sup>134</sup> La feuille artificielle n'absorbe pas de CO<sub>2</sub> ni ne produit de carbone, elle opère seulement un « craquage » de l'eau en séparant oxygène et hydrogène.

#### 2.1.8.4 Conclusion de la conclusion

Notre enquête sur les fondements thermodynamiques de l'accumulation énergétique avait aboutie sur des conceptions, issues d'une expérience, scientifique, politique et humaniste qui nous semble aujourd'hui inconcevable, dont l'autorité scientifique s'imposait dorénavant à nous comme autrement plus fondée, sur de nombreux points, qu'après la théorie de Podolinsky et la critique d'Engels.

Le contexte était maintenant élargi au minimum nécessaire. Notre enquête n'avait eu ni la prétention ni l'objectif d'établir une histoire de la biologie évolutionnaire et de ses diversifications, bien plus complexes que nos propos ; mais seulement, de suivre dans le réseau neuronal de la pensée humaine en évolution du début du XXe siècle (et de son produit, Internet, au XXIème) le cheminement logique d'un ensemble de connexions spécifiques, susceptible de nous mener jusqu'à la source des recherches d'une mesure énergétique du vivant, prolongeant les réflexions de Podolinsky et susceptible de les vérifier.

Et nous avons trouvé mieux que cela puisque l'énergie biogéochimique des organismes vivants selon Vernadsky devenait très proche de nous apparaître comme une « fonction thermodynamique » de l'évolution des espèces et de leur biodiversité.

Cette fonction est apparue à cet endroit exact, au sommet des sciences de la nature, où furent rapprochées les berges de la biologie et de la thermodynamique, pour fonder l'existence d'une énergétique naturelle rendant compte d'une évolution « scientifiquement » opposable à la *flèche du temps* entropique.

Pierre (1996) avait confirmée l'influence de Vernadsky sur l'œuvre de Lotka, mais il est maintenant évident que toutes les figures de proue de cette école russe de la directionnalité, bien plus qu'une influence, auront pour le moins joué, au delà de Clements, un rôle « majeur » quant aux hypothèses énergétiques de Lotka<sup>135</sup>.

Ce petit repositionnement de l'histoire des idées nous apparaît très important. Car ce n'était qu'ainsi que nous pouvions retrouver le lit principal du fleuve (ou le fil rouge) d'une généalogie conceptuelle qui aura originellement proposé une partie majeure des fondements de l'écologie, locale et globale.

Ce faisant, en recollant ses bouts épars depuis son origine jusqu'à son état actuel, nous pouvions réinsérer à sa juste place dans l'écologie moderne, ainsi que dans l'économie écologique qui la prolonge jusque dans nos cités, les justes concepts thermodynamiques d'une énergétique de la nature, éparpillés au long des récupérations successives de l'école de la directionnalité.

Levit (2007b) avait bien souligné le côté absurde de cette récupération, et avec elle d'une situation où les concepts de biosphère et de cycle biogéochimique avaient été importés aux Etats Unis sans référence *primitive* à leur auteur.

Mais le pire est que cette situation, en coupant les concepts de leur source émettrice, aura coupé les disciplines écologiques des grands « paradigmes » scientifiques qui les fondaient, et a pour ainsi dire « dévitalisé » ces disciplines.

---

<sup>135</sup> Et ceci bien que dans un livre qui se voulait « fondateur », *Elements of physical biology*, Lotka ne citait Vernadsky qu'une seule fois, en note de bas de page, pour un problème secondaire de chimie sans rapport avec ses travaux séminaux (Lotka, 1925:201). Et ne citait aucun des membres du groupe de recherche identifié autour de Vernadsky, ainsi que Sewertzoff, qui comme nous l'avons vu fut en 1914 le premier à émettre le concept d'une directionnalité énergétique de l'évolution.

A l'exemple d'une ignorance quasi absolue des deux principes biogéochimiques.

Ceci nous permet de mieux comprendre pourquoi l'écologie universitaire traditionnelle a fait une impasse quasi totale sur les concepts initiaux de la *biogéochimie*<sup>136</sup>, qui nous expliquent la formation, par la matière vivante, de l'atmosphère, de la phase liquide de l'eau, de la production pédologique de la fertilité biologique, ...

Mais plus encore, de comprendre pourquoi il n'est, à notre connaissance, aucun des grands chercheurs qui, après la seconde guerre mondiale, prolongeront en Occident les idées « connues à travers Lotka » (Hutchinson, Odum, Georgescu-Roegen, Cleveland, Daly, Costanza, Jorgensen, ...), pour avoir repris « explicitement » à leur compte une direction de l'évolution strictement « opposable » à l'hégémonie de la conclusion de Clausius.

Ceci quand bien même une exception au principe de Carnot (ou inversement sa vérification) deviendra un des thèmes les plus récurrents de la recherche scientifique moderne sur le vivant, comme en témoignent les travaux de Schrödinger (1944), Brillouin (1956), Bonsack (1961), Von Bertalanffy (1968), Morin (1977), Atlan (1979), Sheldrake (1981), Lussato (1987), Ducrocq (1989), Deware (2003, 2010), Kleidon (2004, 2006, 2010), Martyushev (2013).

Ce repositionnement redresse tant soit peu finalement l'axe de développement des recherches sur l'énergétique de la nature, depuis que Podolinsky avait échoué à en faire une démonstration évidente, et pour cause, à Engels et Marx.

Et va de fait nous permettre d'introduire la seconde dimension problématique de notre quête d'une reformulation approfondie et scientifiquement justifiée des hypothèses de Podolinsky.

---

<sup>136</sup> Et nous verrons plus loin que même un Institut de *biogéochimie*, comme l'Institut Max Planck de Jena semble avoir pratiqué cette même politique de détournement des concepts initiaux de Vernadsky.

## 2.2 Energie, exergie, diversité : Rappel de quelques notions fondamentales

### 2.2.1 Introduction

La précédente section traitait de concepts de l'histoire des sciences du vivant, que nous avons développés comme un discours en forme de « Storytelling », si besoin accompagné de schémas, qui nous a permis d'introduire autant de champs conceptuels et de notions fondamentales qui tous participent de l'élaboration théorique du Bilan écologique.

Cette nouvelle section est une interface. Elle nous plonge dans les eaux froides de la thermodynamique et de la statistique, quoi que nous chercherons à rendre la matière un peu plus attrayante par des illustrations.

L'objectif de cette section est en effet de rappeler sous une forme globale les reliant les uns aux autres, un ensemble de concepts théoriques et mathématiques connus, touchant autant la thermodynamique que les mesures statistiques de la diversité, que notre lecteur n'a pas forcément en tête ; ils préparent non seulement nos propositions à venir, mais avant même celles-ci, une meilleure compréhension de la seconde composante de la problématique à laquelle l'élaboration de notre bilan nous a confrontés.

Notre lecteur n'a cependant pas l'obligation de tout suivre. Parmi les développements qui vont suivre, certains ne doivent leur existence qu'à la justification des formules de calcul que nous avancerons au chapitre suivant.

Celles-ci n'iront pas vers toujours plus de complexité, mais vers plus de simplicité, qu'il faut parfois justifier de manière complexe.

La synthèse de cette section réalisée en fin de chapitre nous semble par contre plus importante.

Elle sera ainsi faite qu'elle devrait nous permettre de ponter les approches thermodynamiques et statistiques de la diversité, pour anticiper la résolution de notre problématique dans une traduction thermodynamique du concept de biodiversité.

### 2.2.2 Eléments de thermodynamique classique

La thermodynamique classique a permis d'élaborer et définir un ensemble de principes, fonctions, propriétés et paramètres, identifiant et mesurant les différents *états d'équilibre* (les grandeurs qui les mesurent deviennent des « variables d'état ») par lesquels passent, au cours de leur(s) transformation(s), les systèmes, énergies et matières concourant aux divers processus techniques de notre économie.

Notre lecteur n'ayant pas forcément étudié la thermodynamique, ou n'ayant pas forcément en mémoire ses principes de base et leur logique générale, nous avons cherchés à simplifier la tâche en illustrant leur exposé par un exemple qui aura permis de dérouler notre présentation de manière, tant que faire se pouvait, cohérente.

Soit une casserole d'eau chaude. Quoique nous prenions cet exemple pour faire simple, c'est un système *ouvert*, en relation avec le milieu extérieur, qui peut connaître avec ce dernier des échanges, tant d'énergie que de matière, aboutissant à des variations d'état très complexes, comme la convection, à partir de la température d'ébullition, que la thermodynamique des processus irréversibles s'est appliquée à décrire. Nous resterons

donc en deçà de cette température, en ne regardant que les échanges d'énergie de base, pour étudier les seules variations d'état suffisant à notre présentation.

### 2.2.2.1 Principales variables d'état

L'état du contenu de cette casserole est déterminé par certaines variables d'état :

- Une masse  $m$  (g, kg, ...). Disons un kg d'eau.
- Une masse molaire  $mmol$  (en grammes par mole), déterminée par le type de matière. Si l'eau de ce kg est considérée pure ( $H_2O$ ), sa masse molaire est égale à celle du dihydrogène  $H_2$  (2,016 g/mole, ou plutôt 2,016 g.mol<sup>-1</sup>) + celle de l'oxygène O (mono oxygène = 15,999 g.mol<sup>-1</sup>), ce qui nous donne 18,015 g.mol<sup>-1</sup> de  $H_2O$ .
  - Une quantité de matière  $n$  mesurée en nombre de moles. Avec 1kg d'eau, nous aurons ainsi une valeur de  $n$  égale à  $1000/18,015 = 55,508$  moles de  $H_2O$  dans notre casserole. Notons que  $n$  exprime pour une même masse la spécificité d'une molécule chimique.
  - Une température  $T$ . Soit la température absolue en degrés kelvin (°K) = température en °C + 273,16. La température de l'espace, dont le vide (de matière) n'est pas absolu, serait de 3°K (-270,16 °C), soit très proche du 0 absolu.
  - Une pression  $p$ . Traditionnellement estimée en bars (1 bar = 1 atmosphère), les calculs thermodynamiques l'estiment plus généralement en pascals. 1 bar = 100.000 (1.E5) pascals, ou encore 1.E5 N.m<sup>-2</sup> (newton/m<sup>2</sup>). La pression atmosphérique standard au niveau du sol étant de 1,01325.E5 pascals.
    - Un volume  $V$  (cm<sup>3</sup>, m<sup>3</sup>, etc.).
    - Une quantité d'énergie en joules. 1 joule = 1 newton.mètre (1 J = 1 Nm).
    - Une variation (différentielle) du niveau de ces variables, notée selon les cas « d » ou « Δ », nous retiendrons « d » pour les cas que nous étudierons.

### 2.2.2.2 Grandeurs extensives et grandeurs intensives

Admettons maintenant que nous versions l'eau de cette casserole, disons d'une température de 80 °C, soit 353 °K, dans une bassine contenant trois litres de la même eau à 20 °C, soit 293 °K.

Que se passe t-il ?

- Le volume de la casserole s'additionne à celui de la bassine
- La température de la casserole ne s'additionne pas à celle de la bassine, mais au contraire s'équilibre avec celle de la casserole.

Ainsi :

- Le volume  $V$  est une grandeur « extensive » (ou additive), c'est à dire proportionnelle à la taille (quantité de matière) du système étudié. Il en est de même de la masse  $m$ , du nombre de moles  $n$ , et de la quantité énergétique  $J$ , pour les variables passées en revue.
- La température  $T$  est une grandeur « intensive », c'est à dire indépendante de la taille ou quantité de matière du système étudié. Il en est de même de la pression  $p$ , de l'entropie  $S$  et d'une autre variable, le potentiel chimique  $\mu$ . Les grandeurs intensives tendent vers l'équilibre thermodynamique.

Ce qui a permis de dire que la thermodynamique classique est une « thermodynamique de l'équilibre » (Prigogine, 1968).

### 2.2.2.3 Division et conjugaison de grandeurs extensives et intensives

- La division de deux grandeurs intensives ou extensives donne une grandeur intensive, comme le volume massique  $V_m$  (en  $\text{m}^3 \cdot \text{Kg}^{-1}$  par exemple) ou inversement la masse volumique  $mV$  (ou densité, en  $\text{Kg} \cdot \text{m}^3^{-1}$  par exemple), qui caractérisent fortement les corps physiques. La pression  $p$  est le résultat d'une telle division ( $\text{newton} \cdot \text{m}^{-2}$ ).

- La conjugaison de deux grandeurs intensives ou extensives donne une grandeur extensive, à l'exemple de  $T$ ,  $p$  et  $\mu$ , qui conjuguées à  $S$  (l'entropie),  $V$  et  $n$ , donneront les nouvelles grandeurs extensives  $TS$ ,  $pV$  et  $\mu n$ .

### 2.2.2.4 La conjugaison « $pV$ », variable d'état d'équilibre

Parmi ces conjugaisons, il y a la variable d'état d'équilibre  $pV$ , nouvelle grandeur extensive issue de la conjugaison de la pression  $p$  et du volume  $V$ . Elle nous donne en sortie une quantité énergétique exprimée en joules.

« Première » explication de la conjugaison  $pV$ : Comme nous multiplions des  $\text{N} \cdot \text{m}^{-2}$  par des  $\text{m}^3$ , une « équation aux dimensions » nous permet d'en déduire que  $\text{N} \cdot \text{m}^{-2} \times \text{m}^3 = \text{Nm}$ , et donc qu'en sortie nous obtiendrons des joules ( $1\text{J} = 1\text{Nm}$ ).

Ce n'est pas explicite a priori, mais  $pV$ , qui suppose toujours une quantité énergétique exprimée en joules, est la conjugaison de grandeurs probablement *la plus essentielle* de la thermodynamique, en ce qu'elle permet de quantifier l'énergie utile qui pénètre tous les processus économiques.

Elle est à l'origine du concept de travail mécanique ( $W$ ), qui va différencier, à l'orée de la révolution industrielle, la nouvelle mesure « dynamique » de la chaleur, la thermodynamique, de son ancienne mesure « statique », la calorimétrie.

Cette conjugaison prendra toute son importance lorsque nous aborderons une mesure énergétique de la biodiversité. Il apparaîtra en effet que, telles que nous les proposerons, la diversité biologique de « réduction » et la diversité biologique « d'oxydation » interagissent entre elles, en proportion directe de  $pV$ , comme une grandeur intensive et une grandeur extensive le font.

Nous reviendrons amplement sur le cas de  $pV$  dans la synthèse du présent chapitre.

### 2.2.2.5 Etats d'équilibre

Calculons maintenant le contenu en énergie calorifique, soit la concentration en chaleur «  $C$  » de nos récipients, ainsi que la température finale de l'eau de notre bassine.

Ce contenu en chaleur est spécifique à chaque corps. Il se mesure en  $\text{J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$  par la capacité calorifique **molaire** à pression constante ( $C_p$ ) ou volume constant ( $C_v$ ), ou par la capacité calorifique **massique** à pression constante ( $c_p$ ) ou volume constant ( $c_v$ ). Comme nous avons ici une pression de l'eau de la casserole et de la bassine « en équilibre » avec la pression atmosphérique (ce qui n'aurait pas été le cas dans une cocotte minute), la pression est constante (le volume, à peu près seulement, et ce n'est dû qu'aux propriétés de l'eau liquide) et nous partons donc du  $C_p$  de l'eau (à l'état liquide) qui est de  $75,3 \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$  à la pression atmosphérique.

Ce qui nous donne :

**Etat 1** : (eau casserole et eau bassine séparées)

- Capacité calorifique massique eau liquide ( $c_p = n/m.C_p$ ) =  $55,508 \text{ mol.kg}^{-1} \times 75,3 \text{ J.mol}^{-1}.\text{K}^{-1} = 4179,75 \text{ J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$
- Contenu calorifique 1 kg eau liquide à  $80^\circ\text{C}$  ( $m.c_p.T$ ) :  $1 \text{ kg} \times 4179,75 \text{ J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1} \times 353 \text{ }^\circ\text{K} = 1.475.452 \text{ J} = 1.475,45 \text{ KJ}$  (kilojoules), c.à.d. une intensité énergétique de  $1.475,45 \text{ KJ.kg}^{-1}$
- Contenu calorifique 3 kg eau liquide à  $20^\circ\text{C}$  ( $m.c_p.T$ ) :  $3 \text{ kg} \times 4179,75 \text{ J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1} \times 293 \text{ }^\circ\text{K} = 3.674,00 \text{ KJ}$ , c.à.d. une intensité énergétique de  $1.224,67 \text{ KJ.kg}^{-1}$
- Soit un contenu calorifique total de  $1.475,45 + 3.674,00 = 5.149,45 \text{ KJ}$

**Etat 2** : (eau casserole et eau bassine mélangées)

- Contenu calorifique total =  $5.149,45 \text{ KJ}$
- Intensité énergétique =  $5.149,45/4 = 1287,36 \text{ KJ.kg}^{-1}$
- Température finale : Partant de l'intensité énergétique du mélange, nous procédons à l'inverse, en la divisant par la capacité calorifique du kg d'eau liquide ( $c_p$ ). Ce qui nous donne :  $1287,36 \text{ KJ.kg}^{-1} / 4179,75 \text{ J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1} = 308 \text{ }^\circ\text{K}$

Et en résumé :

- **Etat 1** : une différence (d) d'intensité énergétique entre casserole et bassine ( $c_p dT$ ) de :  $1.475,45 - 1.224,67 = 250,78 \text{ KJ.kg}^{-1}$
- **Etat 2** : une différence d'intensité énergétique  $c_p dT = 0 = \text{équilibre}$
- Une quantité globale d'énergie calorifique égale pour les états 1 et 2, soit  $5.149,45 \text{ KJ}$
- Une température finale de la bassine de :  $308 \text{ }^\circ\text{K} - 273 = 35 \text{ }^\circ\text{C}$

Cet exemple nous permet de mieux comprendre la raison et l'intérêt de certaines variables d'état fondamentales, telle que la température mesurée en « valeur absolue ». Il eut été en effet impossible de calculer la température résiduelle de la bassine en  $^\circ\text{C}$  sans passer par la température absolue et le contenu énergétique de la matière, fondé sur cette dernière. Le 0 absolu constitue en ce sens un étalon universel de référence pour le cadrage et la mesure des variables d'état d'équilibre, et, ainsi que nous le verrons, pour les « fonctions d'état ».

Il nous permet ensuite d'aborder l'équilibre thermique.

### (a) L'équilibre thermique, retour au concept d'entropie

$35 \text{ }^\circ\text{C}$  est donc la « température d'équilibre » entre l'eau de notre casserole et celle de notre bassine.

Il s'agit ici d'un équilibre « thermique », qui suppose une parfaite égalité (homogénéité) des températures, dont nous n'aurions pu faire apparaître la « tendance » sans mettre en exergue le « différentiel d'intensité » de l'état 1 ( $c_p dT = 250,78 \text{ KJ.kg}^{-1}$ ), qui a induit un échange d'énergie (un courant) sous la forme d'un flux de chaleur «  $Q$  » entre les deux masses d'eau (toujours du plus chaud vers le plus froid), jusqu'à ce que ce différentiel soit épuisé (Etat 2 :  $c_p dT = 0$ ).

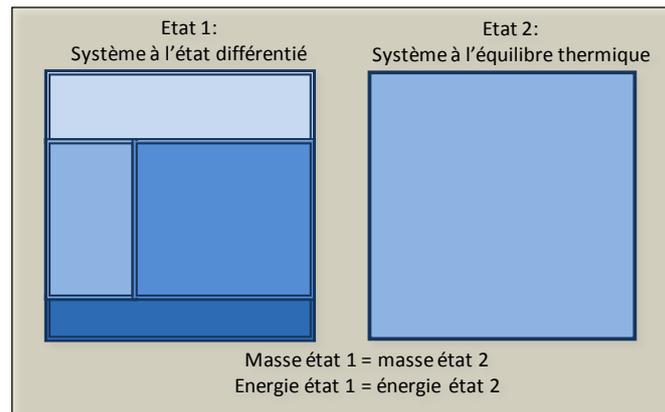
Et ceci alors que pourtant la quantité totale d'énergie disponible avant et après mélange est absolument la même, soit  $5.149,45 \text{ KJ}$ . Ainsi d'ailleurs que la masse, ce qui

constitue un premier motif de la formulation des principes de conservation de la masse et de l'énergie.

Il existe ainsi une « tendance à l'équilibre » qui implique la disparition progressive des « frontières » (thermodynamiques) séparant les différents milieux à l'intérieur d'un même système, ou séparant un système du monde extérieur, ce système serait-il immense, à l'image de l'atmosphère ou de l'hydrosphère.

Figurons ceci par une image, qui peut tout aussi bien représenter les états d'un système microscopique que ceux d'un très grand système d'échelle planétaire :

Figure 19 : Différentiel d'intensité énergétique et équilibre thermique

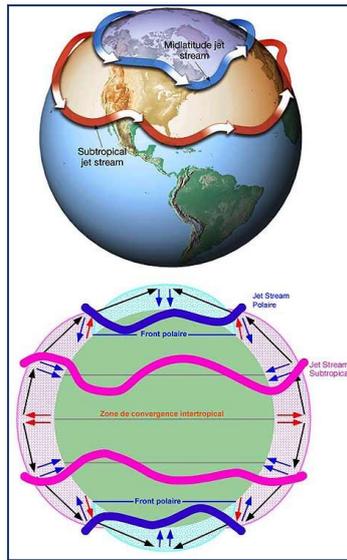


Admettons que cette figure représente les états 1 et 2 de notre exemple (les différents milieux étant ici à peine plus nombreux), mais pour un très grand système à l'image de l'atmosphère ou de l'hydrosphère. A gauche, dans l'état différencié, le double trait séparant chaque milieu de son voisin cherche à signifier que les différents milieux homogènes (en eux mêmes) des grands systèmes, peuvent être séparés les uns des autres par des frontières (autonomes en soi et non simples interfaces), à l'image des frontières caractérisant un système pour la thermodynamique. Ces milieux représentent donc autant de « sous systèmes » potentiels que, ramenés à la Biosphère, nous pouvons donc nommer « compartiments ».

Chose que l'on constate effectivement dans l'atmosphère et l'hydrosphère. Une couche particulière, non homogène en soi, nommée « thermocline », zone de déclinaison thermique, peut isoler plus ou moins fortement les unes des autres des « zones d'intensité », compartiments ou couches, elles mêmes relativement homogènes en soi (en température, pression, densité, potentiel chimique,...).

L'imagerie satellitaire nous a ainsi permis de vérifier qu'aux limites extérieures de l'arctique et de l'antarctique, le « jet stream polaire » constitue une barrière/frontière dynamique isolant de manière quasi étanche les masses d'air chaud subtropicales des masses d'air glacial circulant au dessus des pôles.

Figure 20 : Frontières thermiques et jet stream



Source : <http://la.climatologie.free.fr/>

Et il en est de même pour les écosystèmes, à un niveau encore plus complexe, où des frontières nommées «écotone», zones de transition écologique, séparent les écosystèmes les uns des autres.

Différentiel d'intensité et tendance à l'équilibre sont ainsi deux fonctions universelles qui vont absolument de pair mais complètement à contresens. Il en est ainsi pour tous types de systèmes, fermés ou ouverts, micro ou macroscopiques échangeant de l'énergie avec le milieu. Plus s'établit l'équilibre des températures entre un système et son milieu, plus l'entropie «  $S$  » (thermique dans ce cas), de l'ensemble, augmente.

Mais qu'est-ce que l'entropie, notamment dans son rapport avec l'équilibre ?

Nous aborderons bientôt les grandes « fonctions d'état », mais il est important de revenir sans cesse sur cette notion d'entropie que, comme nous le verrons plus loin, un immense mathématicien comme John Von Neumann, discutant avec Claude Shannon de cette notion, disait difficile à comprendre dans ses applications pratiques.

La chaleur  $Q$  (tout comme le travail  $W$ ) est une énergie en transit qui soit traverse la surface de séparation (la frontière) entre le système et le milieu extérieur (vu comme le reste de l'Univers), ou entre deux sources à l'intérieur du système. C'est une grandeur de transfert.  $Q$  n'est donc pas un « stock » d'énergie statique, mais l'expression d'un « flux » de chaleur entre deux sources, résultant de leur différentiel d'intensité énergétique. Et flux pour lequel cette lettre  $Q$ , en majuscule, représente le « symbole » d'une conjugaison de variables d'état (une fonction d'état que nous dirons « de niveau 2 ») qui, ensemble, expriment et mesurent ce flux de chaleur, nous donnant ainsi l'équation de la « chaleur élémentaire »

$$Q = dq = nCdT \quad (5)$$

On saisit intuitivement que toute augmentation du différentiel d'intensité  $CdT$  (en  $J.mol^{-1}$ ) impliquera une certaine « distance à l'équilibre », qui elle même impliquera une augmentation du flux d'échange de chaleur  $Q$ , en joules, tendant vers l'équilibre entre ces deux sources, à l'exemple planétaire des grands courants océaniques comme El Niño.

Or toute augmentation du flux de chaleur  $Q$  implique l'augmentation corrélative d'un flux spécifique nommé « entropie » ( $S$ ) tel que l'on peut écrire :

$$dS = \frac{dq}{T} \quad \text{ou encore} \quad TdS = dq \quad (6)$$

L'entropie  $S$  s'exprime en effet en  $J.K^{-1}$  par rapport à la température absolue  $T$ , alors que  $Q$  ( $dq$ ) s'exprime en joules.

Elle est donc indépendante de la température, telle que l'illustre la figure 9.

L'équilibre serait donc un état terminal, et l'entropie le chemin (disons plutôt le processus) qui y mène, à travers différentes étapes ou états d'équilibre progressifs, jusqu'à l'équilibre final, l'équilibre thermodynamique.

L'entropie  $S$ , égale à un flux de chaleur, implique ainsi la disparition progressive des barrières ou frontières séparant les différents états d'équilibre les uns des autres, en direction de l'équilibre.

Ce qui ne veut pas dire pour autant que l'entropie soit synonyme d'équilibre ! Nous verrons que leur différence fonctionnelle, qu'il importera d'établir, prendra au cours de ce travail un caractère essentiel pour la mesure de la diversité.

Toutes choses qui nous amènent à établir un constat qui nous servira tout au long de notre quête d'un indice de biodiversité :

- A énergie ou masse constante, la seule séparation en compartiments homogènes (en état d'équilibre interne) des niveaux différents d'intensité énergétique d'un système, constitue une organisation, un ordre, ou une structure en soi (figure 19), de niveau plus ou moins complexes, et donc plus ou moins loin de l'équilibre.

- Ce qui suppose à l'inverse, que la tendance (universelle à priori) vers l'équilibre (de ces états d'équilibre différenciés), induit la disparition corrélative de cette structure et une diminution de l'ordre ou de l'organisation interne. C'est à dire une augmentation de l'entropie.

C'est la raison essentielle pour laquelle l'entropie, de signe positif ( $S^+$ ), est universellement associée à une perte d'ordre, pour une égale quantité globale d'énergie du système. A contrario, l'entropie « négative » (notée  $S^-$  ou  $-S$ , ou encore  $\bar{S}$ ), sera associée à un gain d'ordre interne.

### (b) L'équilibre mécanique

Il est lui aussi atteint quand il y a égalité de l'intensité énergétique entre deux compartiments. Mais il implique cette fois le produit  $pV$  de la pression  $p$  par le volume  $V$ , égal à un flux d'énergie en joules, sous une forme qui va impliquer un mouvement et produire du travail  $W$ .

Prenons l'exemple du piston d'un moteur dans son cylindre. Là où l'eau ( $H_2O$ ) de nos récipients changeait d'intensité énergétique à volume et pression relativement constants, mais à  $T$  variable et sans changer d'état (comme passer par exemple de l'eau liquide à l'eau vapeur au dessus de  $100^\circ C$ ), c'est cette fois-ci un ensemble de matières un peu plus complexe, soit du carbone fossile (gasoil, essence, ... =  $CH_2O$ ) et de l'oxygène ( $O_2$ ), qui vont ensemble changer d'état jusqu'à produire un nouvel équilibre en sortie de réaction.

La réaction de combustion du carbone en présence d'oxygène donne du gaz carbonique et de l'eau + de l'énergie selon l'équation stœchiométrique :  $C_6H_{12}O_6 + 6O_2 \leftrightarrow 6CO_2 + 6H_2O + \text{énergie libre}$ .

Examinons cette réaction avec précision, car elle nous servira à illustrer d'autres processus. Les données sur l'exergie et l'énergie libre de Gibbs des éléments chimiques proviennent de Valero Delgado (2008).

Tableau 4 (figure 21) : Conservation de la masse et de l'énergie lors d'une réaction

Element par élément				Glucose				
Formule chimique	Masse molaire	Exergie molaire	Exergie massique	Moles de chaque élément	Masse molaire	Exergie molaire	Masse	Exergie massique maximale
	g.mol <sup>-1</sup>	KJ.mol <sup>-1</sup>	MJ.kg <sup>-1</sup>	Formule	g.mol <sup>-1</sup>	MJ.mol <sup>-1</sup>	g.kg <sup>-1</sup>	MJ.kg <sup>-1</sup>
<b>Entrée de réaction (oxydation)</b>								
C	12,011	410,250	34,157	C <sub>6</sub>	72,064	2,462	400,01	13,663
H <sub>2</sub>	2,016	236,100	117,119	H <sub>12</sub>	12,095	1,417	67,14	7,863
O	15,999	1,985	0,124	O <sub>6</sub>	95,996	0,012	532,85	0,066
$\Sigma C_6H_{12}O_6$					180,156	3,890	1000,00	21,592
O <sub>2</sub>	31,999	3,970	0,124	6O <sub>2</sub>	191,993	0,024	1065,70	0,132
$\Sigma C_6H_{12}O_6 + 6O_2$					372,149	3,914	2065,70	21,725
<b>Sortie de réaction (oxydation)</b>								
<b>Energie libre de Gibbs dissipée (G)</b>						<b>3,738</b>		<b>20,747</b>
CO <sub>2</sub>	44,010	19,870	0,451	6CO <sub>2</sub>	264,057	0,119	1465,71	0,662
H <sub>2</sub> O	18,015	9,490	0,527	6H <sub>2</sub> O	108,092	0,057	599,99	0,316
$\Sigma G + 6CO_2 + 6H_2O$					372,149	3,914	2065,70	21,725

Sources : Szargut, Valero et autres, 2005 ; Loiret, 2013a

Le volume et la pression ( $pV$ ) d'un gaz parfait (auquel nous pouvons assimiler O<sub>2</sub> et CO<sub>2</sub>), sont déterminés par une équation, dite « loi des gaz parfaits », selon laquelle

$$pV = nRT \quad (7)$$

Avec :

$$d(pV) = Vdp + pdV \quad (8)$$

Où nous reconnaitrons nos variables d'état, à l'exclusion de « R », la constante universelle des gaz parfaits :  $R = 8,314472 \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$

En sortie de réaction les 6 moles mélangées de CO<sub>2</sub> et H<sub>2</sub>O (gaz humide) auront récupérés les 3,738 MJ d'énergie libre auparavant liée aux molécules de CH<sub>2</sub>O + O<sub>2</sub>.

Retournons maintenant à notre piston. Ce qui s'y passe ensuite va illustrer la variation interne de  $pV$ , à  $pV$  constant. Du fait de dégagement quasi instantané d'énergie, la pression  $p$  du gaz humide augmente très fortement, mais va tendre instantanément vers l'équilibre avec le volume.

Le volume du gaz humide va alors augmenter au prorata de la descente de la pression vers l'équilibre (équation (8)), ce qui a pour effet de déclencher le mouvement du piston.

Et ce qui permet d'écrire l'équation thermodynamique du travail mécanique  $W$  (qui représente avec  $Q$  la deuxième fonction d'état de niveau 2)

$$W = -p_o dV \quad (9)$$

Où :

- Le signe négatif montre que cette différence de volume a pour corolaire un apport d'énergie libre en provenance du monde extérieur. Ceci d'après une convention selon laquelle, si  $dV < 0$  (diminution de volume), alors  $W > 0$ , et si  $dV > 0$  (augmentation de volume), alors  $W < 0$

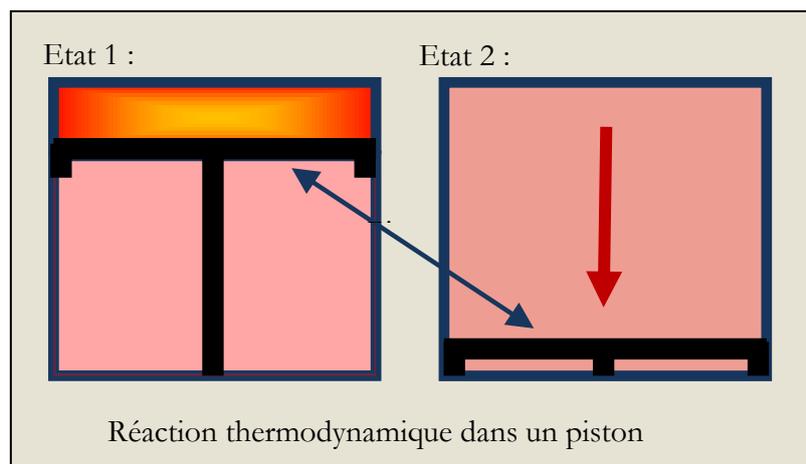
- $p_o$  suppose que la pression de sortie est égale à la pression d'entrée (après équilibre)

- $dV$  représente la variation de volume

Ainsi, nous avons affaire à une même énergie  $pV$ , mais bien que ce soit la variation du volume qui produise l'effet travail, c'est la « tendance à l'équilibre » de la pression qui en a été la cause.

Cette tendance à l'équilibre de la pression (après réaction ou oxydation) par augmentation de volume, à  $pV$  constant, nous pouvons la représenter par le schéma suivant :

[Figure 22 : Différentiel de pression et équilibre mécanique à  \$pV\$  constant](#)



Tout le « génie » de la thermodynamique classique consiste ainsi à avoir « séparé » (isolé l'une de l'autre) les formules «  $Vdp$  » et «  $pdV$  » (combinées dans l'équation (8)), pour développer le fameux « cycle de Carnot » du travail mécanique.

Et l'origine de cette pression, à l'exemple du ballon que nous tenons entre nos mains, vient bien du « monde extérieur » au système, c'est à dire pour cet exemple, de nos mains sur le ballon (+  $Vdp$ ), quand le volume, qui va produire le travail récupérable, est interne au système ballon (-  $pdV$ ).

### (c) L'équilibre osmotique

Il implique une égalité des « potentiels chimiques », une variable d'état intensive au symbole  $\mu$ , que nous n'avons pas illustrée par un exemple compréhensible.

Le potentiel chimique est lié, en sus du nombre de moles  $n$  d'un composant chimique donné, à la fonction d'état « énergie libre de Gibbs », au symbole  $G$ , présente dans notre tableau 4. Nous y reviendrons en temps voulu.

Prenons en attendant une image très simple. Admettons que nous fassions tomber quelques gouttes d'encre de Chine dans notre bassine d'eau. L'eau et l'encre ont un potentiel chimique très différencié. A l'équilibre « osmotique », l'eau aura pris une couleur grisée partout homogène dans la bassine.

#### (d) L'équilibre thermodynamique

Il existe au final 3 formes d'équilibre, liées aux variables intensives et extensives conjuguées (donc des variables d'état d'équilibre) de :

- $T$  et  $C$  ( $C_v$  ou  $C_p$ ), pour l'équilibre thermique
- $p$  et  $V$  pour l'équilibre mécanique
- $\mu$  et  $n$  pour l'équilibre osmotique

La variable intensive jouant chaque fois un rôle élastique ou de ressort en détente amenant vers un nouvel état d'équilibre.

L'équilibre thermodynamique, équilibre parfait ou tout différentiel est égal à 0, est atteint lorsqu'il y a conjugaison des trois formes d'équilibre : thermique, mécanique et osmotique.

#### 2.2.2.6 Fonctions d'état, grands principes, petite introduction

Nous avons abordé les variables d'état et leurs conjugaisons, puis sommes entrés dans plus de détails avec les notions de chaleur  $Q$  et de travail  $W$ , flux d'énergie qui intègrent à un niveau supérieur les variables d'état élémentaires et leurs conjugaisons.

La thermodynamique apparaît ainsi comme une science paradoxale, où plus nous entrons dans le détail de « son » explication des phénomènes naturels, plus nous nous élevons vers le « sommet conceptuel » des principes qui ont présidé à son élaboration.

Il nous semble important de souligner le caractère hiérarchique de cette discipline, qui évolue par niveaux d'intégration progressifs vers les grandes « fonctions d'état » ; il ne semble pas évident pour tout le monde, et l'était d'autant moins pour nous, à l'orée de notre thèse.

Qu'est-ce qu'une fonction d'état ?

Prigogine répond ainsi :

Toute fonction qui peut être exprimée à l'aide des variables d'état est une fonction d'état du système étudié [Prigogine, 1968].

Mais si l'on s'en tient à la définition élémentaire d'une fonction mathématique :

Une grandeur dépendant d'une ou plusieurs variables [<http://www.linternaute.com/dictionnaire>].

Les variables élémentaires, ainsi que les conjugaisons de variables  $pV$ ,  $mV$ , etc., qui peuvent mesurer comme nous l'avons vu des grandeurs significatives, exprimeraient donc déjà en elles mêmes des « fonctions d'état ».

Mais les avis divergent, et une fonction semble avoir un sens plus précis qu'il est utile d'éclairer. Il ressort en effet de plusieurs autres définitions qu'elle signifie le plus généralement un « ensemble de propriétés descriptives parfaitement circonscrit » : ensemble d'obligations et devoirs, ensemble des propriétés actives d'un organe, ensemble

de nombres, relation entre deux ensembles, ensembles d'opérations, ensemble des propriétés d'un mot dans une phrase, ...

A ce titre, une fonction d'état doit avoir cette propriété nouvelle de pouvoir décrire en un tout cohérent l'ensemble des propriétés d'un système, pour un état d'équilibre donné.

Nous retiendrons cette dernière définition, ne serait-ce que pour mieux différencier les variables et leurs conjugaisons, des fonctions vues comme ensembles de propriétés en soi.

Et ceci sauf à faire une petite distinction au sein même de ces fonctions d'état, en différenciant les « grandes » fonctions d'état (qui découlent directement des premiers et seconds principes de la thermodynamique), et que nous qualifierons de « niveau 1 », des ensembles de variables qui participent de leur formulation, comme la chaleur  $Q$  et le travail  $W$ , auxquels nous attribuerons le « niveau 2 ».

Les grandes fonctions d'état sont supposées avoir un caractère « universel », valable jusqu'aux confins de l'Univers, ce qui explique l'ampleur des débats qu'elles ont occasionnés. Alors que les fonctions de niveau 2, à l'exemple de  $Q$  et  $W$ , ne trouvent une application concrète qu'au sein de l'économie humaine et de ses rouages « mécaniques ».

### 2.2.2.7 Principe de conservation de la masse

La thermodynamique énonce généralement le principe de conservation de la masse avant d'aborder le premier principe (conservation de l'énergie).

Ce principe postule que dans un système « fermé » contenant  $N$  constituants entre lesquels une seule réaction chimique est possible, toute variation des masses résultera uniquement de la réaction chimique (Prigogine, 1968). Ce qui veut dire que pour une masse totale constante des constituants, en entrée et sortie de réaction, nous aurons une variation des masses spécifiques des constituants, tout comme nous le vérifions dans le [tableau 4](#).

Prigogine (1968:3), énonce ce principe sous la forme :

$$dm = (\sum_{\gamma} v_{\gamma} M_{\gamma}) d\xi = 0 \quad (10)$$

où  $dm$  représente la variation de masse totale du système,  $M_{\gamma}$  la masse moléculaire du constituant  $\gamma$ ,  $v_{\gamma}$  son coefficient stœchiométrique dans la réaction, et  $d\xi$  le degré d'avancement de la réaction.

Nous n'entrerons pas dans plus de détails. Notons seulement que la thermodynamique l'a étendu aux systèmes « ouverts », sous la forme :

$$dm = dm_e \quad (11)$$

où  $dm_e$  représente la masse provenant de l'extérieur du système (Prigogine, 1968:6).

Ce qui suppose que la seule variation de masse est celle provenant du monde extérieur au système, quand en interne elle reste constante, quelles que soient les réactions chimiques.

Certains ont étendu ce principe à l'échelle planétaire, où, la terre étant considérée comme un système « relativement ouvert », sa seule variation de masse résulterait, lors de ses

myriades de réactions chimiques, de la masse nouvelle provenant de l'espace (météorites), où de celle sortant de l'atmosphère vers l'espace, à l'exemple de l'hydrogène  $\text{H}_2$ .

### 2.2.2.8 Premier principe de la thermodynamique

A l'exemple de la conservation de la masse, le premier principe de la thermodynamique énonce que lors de toute réaction dans un système fermé, il y a conservation de l'énergie, ce que là aussi nous avons illustré et vérifié dans le tableau 4.

Mais quelle énergie ? Le premier principe se charge de le préciser, en postulant l'existence de sa première grande fonction d'état (de niveau 1 donc).

#### Fonction d'état énergie interne (U) ou totale (E)

Il existe selon les auteurs, au moins deux formulations différentes de cette fonction d'état, selon que l'on prenne en compte l'énergie interne « U » ou l'énergie totale « E ».

Formulation 1 : Ce principe postule que : Pour tout système « fermé », il existe une fonction d'état conservative, homogène à une énergie, appelée énergie interne et notée  $U$ , telle que :

$$dU = Q + W \quad (12)$$

Cette formule suppose à priori que lors de la production de travail par variation d'énergie interne, il y a dans le même temps un dégagement de chaleur qui produira nécessairement de l'entropie (revoir formule plus loin)

Formulation 2 : Nous la trouvons encore chez Prigogine :

Dans sa forme générale, ce principe postule l'existence d'une fonction d'état, appelée énergie du système, telle que sa variation par unité de temps soit égale à un certain flux appelé flux d'énergie provenant de l'extérieur ». [Prigogine, 1968:7].

Il formule ensuite symboliquement cette proposition en analogie avec la formule (12) :

$$dE = dE_e \quad \text{ou encore} \quad dE_i = 0 \quad (13)$$

Puis il précise plus loin que « L'énergie fournie par l'extérieur durant l'intervalle de temps  $dT$  est égale à la somme de la chaleur et du travail mécanique échangés à travers les frontières du système », ce qu'il traduit par la formule :

$$dE = dq - pdV \quad (14)$$

Et ce qui nous permet d'établir la relation avec la formule (12), compte tenu des formules (5) et (9). A savoir que :

$$dE = dq - pdV = Q + W$$

#### Relations entre E et U, clarifications sur Q et W

Mais il nous faut clarifier les raisons d'être tantôt de  $E$  tantôt de  $U$  pour représenter l'énergie interne. Nous pourrions penser en effet que tout ceci est bien contradictoire, si Lhuillier et Rous, dans leur *Introduction à la thermodynamique* (1998), ne précisait, à propos du premier principe :

**L'énergie totale d'un système isolé se conserve.** Cette énergie peut se manifester sous différentes formes ; ainsi vous avez été amenés à considérer en mécanique l'énergie cinétique d'ensemble d'un système, éventuellement son énergie potentielle de pesanteur : ce sont des notions qui concernent des objets macroscopiques. Au niveau microscopique, on vous a appris l'existence d'interactions électrostatiques ou gravitationnelles donnant lieu à des termes d'énergie potentielle entre les atomes, et l'on vous a enseigné que le changement des arrangements microscopiques auquel donnent lieu les réactions chimiques se manifestait par des énergies de réaction chimique. Enfin, la température est reliée à l'énergie cinétique microscopique de translation des molécules. Toutes ces formes d'énergie sont incluses dans le terme "énergie totale" de l'énoncé ci-dessus.

Pour un système isolé :  $E_{\text{Totale}} = E_{\text{Mécanique}} + U$ , où :

- $E_{\text{Mécanique}}$  est l'énergie éventuelle de translation, de rotation du système
- $U$  est l'énergie interne du système [Claire Lhuillier et Jean Rous, 1998].

Négligeant ici cette énergie mécanique supplémentaire, nous considérerons dans notre travail que  $E = U$ , et nous ne nous référerons donc plus qu'à l'énergie interne  $U$ , ne serait-ce que pour limiter le potentiel de confusion entre tous les types d'énergie de la thermodynamique.

Ceci étant précisé, sauf à s'en servir comme référentiel, ne donnons pas plus d'intérêt que cela à cette énergie  $U$  (que l'on peut voir comme un stock) pour les sujets qui nous concernent, car de toute façon, la thermodynamique ne donne jamais sa grandeur, précisant qu'elle n'est pas calculable à l'échelle des applications auxquelles elle s'intéresse, si tant est qu'elle soit calculable.

La thermodynamique ne s'intéresse ainsi qu'aux « variations d'état » de  $U$ , formalisées par une variation d'énergie interne, constituée par la somme des deux flux de chaleur et de travail, en direction de l'équilibre.

Ce qui nous ramène à cette formule simple :

$$dU = dq - pdV \quad (15)$$

Nous apporterons par ailleurs une petite précision sur les flux  $Q$  et  $W$  de l'égalité (12). Selon les auteurs, nous trouvons soit  $dU = Q + W$ , soit  $dU = -W + Q = Q - W$ .

Ces formulations, à priori très paradoxales, s'expliquent en fait très simplement. Comme nous l'avons vu, l'équation du travail (9) nous donne  $W = -pdV$ . La formule (14) est donc une formule de calcul « numérique » exprimée par combinaison de variables d'état. Alors que la formule (12) est une formule « symbolique » combinant deux fonctions d'état de niveau 2. Passant selon les auteurs de la combinaison de variables à la combinaison de fonctions, cela explique que  $Q + (-W)$  soit devenu  $Q - W$ .

Un tel changement de signe entre une formule de niveau symbolique (fonctionnel) et son équivalent numérique (calcul pratique) est courant, et nous devons y faire attention, notamment avec l'énergie libre  $G$ .

Fonction de la sensibilité des auteurs, la thermodynamique peut ainsi devenir très difficile à assimiler, son aura de mystère, son caractère abrupt, froid et autoritaire n'arrangeant rien à l'affaire, surtout quand elle n'est pas accompagnée d'exemples.

Ce qui nous montre l'intérêt de bien différencier variables d'état, conjugaisons de variables, et enfin fonctions d'état de niveau 2 puis 1, car nous (un non spécialiste s'entend) avons pu entrer parfois dans des « pièges » logiques insolubles, qui nous ont posé parfois de longs problèmes de clarification.

Clarification dont nous avons souhaité faire profiter celui de nos lecteurs qui ne serait pas familiarisé, et clarification qui servira nous l'espérons à clarifier notre propre objet.

### Fonction d'état enthalpie (H)

Toujours dans le cadre du premier principe, la thermodynamique formule un second « grand concept » d'énergie : l'enthalpie  $H$ . Ce qui avec l'énergie calorifique, la chaleur, le travail, l'énergie totale ou interne, plus les autres énergies comme l'enthalpie libre, l'énergie libre (il en existe au moins deux formules différentes), peut rendre la compréhension des arcanes de cette discipline d'autant plus difficile.

L'enthalpie est premièrement définie par la relation :

$$H = U + pV \text{ et donc parfois } H = E + pV \quad (16)$$

L'enthalpie est donc définie au moyen d'une énergie interne  $U$  que l'on ne peut ou veut mesurer, à laquelle s'ajoute notre plus familier «  $pV$  », dont nous savons maintenant qu'il représente l'énergie du « monde extérieur », dont une partie va pénétrer notre système, en se transformant en pression ( $Vdp$ ) puis en volume ( $-pdV$ ).

On ne connaît donc pas mieux l'enthalpie que l'énergie  $U$ , étant donné que cette dernière nous échappe. Raison pour laquelle on apprécie l'enthalpie, comme l'énergie  $U$ , par la variation d'une somme de flux selon la formule :

$$dH = dq + Vdp \quad (17)$$

Comme les significations (les fonctions spécifiques) de  $U$  et  $H$  peuvent ici apparaître relativement obscures, nous tenterons de les éclaircir dans notre petite synthèse de cette section.

#### 2.2.2.9 Second principe de la thermodynamique

Le second principe établit l'irréversibilité des phénomènes physiques, notamment lors des échanges thermiques. Sadi Carnot l'a formulé dans son seul et unique ouvrage (Carnot, 1824), qui explicite le célèbre « cycle de Carnot », donnant ainsi à la mécanique la dimension d'une science gouvernée par des lois parfaitement raisonnées.

Puis, comme nous l'avons vu (paragraphe 2.1.6.) Rudolph Clausius a isolé cette irréversibilité, en élaborant le concept d'« entropie », et en formulant les deux premiers principes :

- 1 - L'énergie de l'univers est constante.
- 2 - L'entropie de l'univers tend vers un maximum.

### Fonction d'état entropie (S)

Le second principe introduit donc la fonction d'état entropie ( $S$ ), assimilable au désordre résultant d'une destruction des frontières internes et externes isolant les différents états.

C'est Ludwig Boltzmann, un des pères (avec Maxwell et Gibbs) de la « physique statistique » (dite encore « thermodynamique statistique »), qui a apporté en 1877 un outil de mesure (statistique) précis de l'entropie, avec sa célèbre formule (et ses variations) :

$$S = k \cdot \ln \Omega \text{ (l'originale) ou } S = k_B \log W \quad (18)$$

Avec  $k$  ou  $k_B$  la constante de Boltzmann ( $1,380\,6505 \times 10^{-23} \text{ J.K}^{-1}$ ).

Et avec  $\Omega$  le nombre de complexions d'un système (ou nombre de configurations), ou encore  $W$  (à ne pas confondre avec le travail) le nombre de microétats d'un système.

L'entropie statistique de Boltzmann répondait au « théorème H », qui parlait d'une certaine grandeur  $H(t)$  variant de façon monotone au cours du temps, tandis qu'un gaz relaxe vers l'équilibre, et qu'il démontra en 1872 en étudiant la théorie cinétique des gaz.

L'entropie est ainsi une fonction d'état « extensive » qui grandit au prorata de la désorganisation interne et du flux de chaleur.

Mais Prigogine (1968:19) détaille cette première formule en établissant sa relation avec l'énergie interne  $U$  (ou  $E$ ) :

$$dS = \frac{dU + pdV}{T} \text{ ou encore } TdS = dU + pdV = dq \quad (19)$$

En précisant que :

$$d(TS) = SdT + TdS \quad (20)$$

### 2.2.2.10 Extensions des deux premiers principes

#### Energie libre de Gibbs (G) ou enthalpie libre

Nous voyons dans le tableau 4 la présence d'une forme d'énergie nommée « énergie libre de Gibbs ». Son autre nom est « l'enthalpie libre », c'est à dire la part de l'énergie  $pV$  (l'énergie du monde extérieur), elle même partie de l'enthalpie ( $H = U + pV$ ), qui n'est pas sous forme d'entropie au titre du second principe.

Ramenée à l'échelle d'un matériau quelconque du monde extérieur, l'énergie libre représente la part de son contenu énergétique total réellement disponible pour le travail  $W$  lors d'une transformation ou d'une réaction. C'est l'énergie « exploitable », tel le rayonnement solaire, mais une fois seulement qu'il a été capté et stocké sous forme de carbone. Mais nous comprendrons mieux sa fonction particulière en la comparant plus loin avec l'« exergie ».

La formule générale de l'énergie/enthalpie libre nous donne :

$$G = H - TS^{137} \text{ ce qui donne aussi } H = G + TS \quad (21)$$

Au titre des formules (8), et (15) à (20), nous pouvons en déduire que :

$$dG = dH - d(TS) = Vdp - SdT \quad (22)$$

---

<sup>137</sup> Notons que, au titre du second principe les spécialistes de thermodynamique classique déduisent systématiquement de cette formule que « l'énergie libre  $G$  tend vers un minimum ». Ce qui est logique dans un système fermé inerte alimenté en énergie provenant du milieu extérieur, mais s'avère hors de propos pour les écosystèmes naturels.

Et finalement, au titre des formules complémentaires (13) à (17) que :

$$dH = dG + d(TS) = dU + d(pV) \quad (23)$$

En reprenant la formule (16), et si nous mettons  $U$  (l'énergie interne) de côté, en considérant que celle-ci est l'énergie du système économique, l'énergie totale, l'enthalpie  $H$  devient assimilable à l'énergie  $pV$  du milieu extérieur (de l'environnement) et sa variation aux variations  $Vdp$  et  $p dV$  des composantes de  $pV$  (formule 8).

$pV$  sera alors égal à  $G + TS$ , et ce sont l'énergie libre  $G$  et l'entropie  $S$  qui représenteront « ensemble » les composantes de l'énergie totale de l'environnement au sein de l'enthalpie  $H$ .

$G$  et  $S$  sont ainsi les « symboles » thermodynamiques des variables « intensives »  $Vdp$  et « extensives »  $p dV$ , telles que nous les avons étudiées avec l'équilibre mécanique. C'est à dire une variation soudaine de pression  $Vdp$  tendant vers l'équilibre, puis transformée en une variation de volume  $p dV$  et d'énergie  $dU$ , qui au final produiront de l'entropie  $S$ .

Ce qui nous montre bien que le cœur de la thermodynamique, et donc de la cité moderne, tourne autour de la transformation en travail  $W$  et entropie  $S$  d'une portion de  $pV$ , l'énergie libre  $G$  du « monde extérieur » (assimilable à la nature) absorbée par le « système » (assimilable à la cité et à l'économie), lui même ayant une énergie interne ( $U$ ) a priori inconnaissable. L'entropie  $S$  étant ensuite réabsorbée au sein de  $pV$ .

Nous essaierons dans la synthèse de ce chapitre d'en tirer quelques constats et enseignements directement utiles à nos démonstrations du chapitre suivant.

### Energie libre $G$ et potentiel chimique $\mu$

Des atomes aux molécules complexes, tous les éléments chimiques possèdent leur niveau spécifique d'énergie, l'énergie libre molaire.

Le potentiel chimique ( $\mu$ ) d'un constituant physico-chimique  $i$  (mesuré en joules, par mole ou par gramme), partie d'une substance chimique  $j$ , correspond à l'énergie libre molaire partielle de ce constituant, fonction de sa quantité spécifique (proportion) de matière  $n_i$  à l'intérieur de cette substance. C'est une variable *intensive*, égale à la dérivée partielle (une variation infinitésimale) de l'énergie libre  $G$  de la substance, par rapport à la quantité de matière  $n_i$  de ce constituant, les autres variables du système étant constantes.

Le potentiel chimique de chaque constituant  $i$ , partie de l'énergie totale de la substance  $j$ , est défini par la formule :

$$\mu_i = \left( \frac{\partial G}{\partial n_i} \right)_{T,p,n_j} \quad (24)$$

Et l'énergie totale  $G$  de cette substance, par la formule :

$$G = \sum_i n_i \cdot \mu_i \quad (25)$$

Il existe ainsi une relation directe entre l'énergie libre  $G$  et le potentiel chimique  $\mu$ .

Relation complétée, pour la variation de  $G$ , par la formule :

$$dG = Vdp - SdT = \sum_i d(n_i \cdot \mu_i) \quad (26)$$

Et en présence d'une réaction chimique :

$$dG = Vdp - SdT + \sum_i \mu_i \quad (27)$$

### Exergie $E_x$ et énergie libre $G$

Le potentiel chimique exprimait très bien l'incorporation de l'énergie libre  $G$  dans la matière vivante et inerte, et il ne manquait qu'un petit pas pour caractériser cette nouvelle forme d'énergie « utile » contenue dans la matière ainsi que son support.

La thermodynamique chimique a ainsi introduit dès 1956 un concept plus précis, exprimant cette incorporation : **l'exergie**.

Comme la différence entre ces deux concepts n'est pas toujours évidente, au regard notamment du potentiel chimique, il importe maintenant de bien la clarifier, vue son importance au sein de ce travail.

Comme nous l'avons vu et le reverrons, de nombreux auteurs ont depuis utilisé l'exergie pour l'analyse des processus (thermodynamiques) de l'économie matérielle et de leur consommation d'énergie.

Mais le concept formalisé par Wall (1977) reste ambigu sur les rapports entre l'exergie et l'énergie libre de Gibbs. Nous devons son développement le plus rigoureux, au sens d'une stricte définition mathématique de sa mesure, autorisant le recensement systématique des « ressources exergetiques terrestres », aux travaux de Jan Szargut, avec ses efforts constants pour établir un environnement de référence international en matière d'exergie chimique (Szargut, et autres, 2005).

C'est de ce dernier que nous tirons la formule de calcul de l'exergie, très proche de la formule (25) :

$$Ex_j = dG_{fj} + \sum_i n_{i,j} \cdot Ex_i \quad (28)$$

Avec :

$Ex_j$  L'exergie chimique de la substance  $j$

$dG_{fj}$  L'énergie libre de « formation » de la substance  $j$

$n_{i,j}$  Le nombre de moles de l'élément  $i$  par mole de substance  $j$

$Ex_i$  L'exergie chimique de l'élément  $i$  contenu dans la substance  $j$

A la différence de la formule (25), l'exergie, qui est en cohérence parfaite avec la stœchiométrie, met ainsi en relief, dans une équation réversible, à l'exemple du glucose de nos tableaux 4 et 5 :  $C_6H_{12}O_6 + 6O_2 \leftrightarrow G + 6CO_2 + 6H_2O$ , la différence entre :

- Partie gauche de l'égalité de droite : L'énergie libre  $G$  provenant de la source externe, comme le rayonnement solaire, qui servira à la formation de la nouvelle substance (le).

- Partie droite de l'égalité de droite : La somme des exergies spécifiques (exergie molaire  $x$  par nombre de moles) des éléments ( $CO_2$  et  $H_2O$ ), servant de support à la fixation de l'énergie libre  $G$  provenant de l'extérieur

- Egalité de gauche : L'exergie de la nouvelle substance résultant de cette transformation.

Ainsi, lorsqu'un ensemble de molécules incorpore un flux énergétique (lors de la réduction photosynthétique), celui-ci permettra la fusion de leurs exergies spécifiques pour former une nouvelle combinaison moléculaire, dont l'exergie aura augmentée au prorata de l'ensemble des éléments entrant.

Ce qui nous permet à l'inverse de connaître très précisément l'énergie libre disponible lors d'une réaction, à l'exemple du carbone dans la chambre de combustion d'un cylindre.

L'exergie représente ainsi une « incorporation matérielle » de l'énergie libre, dont la formulation permet d'établir une structuration extrêmement précise des éléments divers à origines de l'énergie spécifique d'une substance, et ainsi d'avoir des calculs considérablement plus précis que ceux donnés par la formule (21).

L'exergie enfin met le doigt sur un élément souvent négligé dans les calculs énergétiques concernant les écosystèmes ou les processus économiques : Le dioxyde de carbone, l'oxygène et l'eau, tout comme l'ensemble des molécules de la Biosphère, ont leur contenu spécifique en exergie, comme on pourra le constater dans le tableau 5.

Ce qui suppose que les différents compartiments de la Biosphère, l'atmosphère, l'hydrosphère et la lithosphère, aient leur propre niveau d'exergie (et d'énergie libre), calculable très précisément à partir de l'exergie spécifique de leurs différents constituants (Valero Delgado, 2008).

La question subsidiaire posée par notre thèse, que nous aborderons dans la section suivante, étant celle de l'énergie *biogéochimique* du vivant, différente de celle.

Tous éléments que nous résumerons et illustrerons dans le tableau ci-dessous, qui représente la contrepartie (l'inverse) de la transformation du tableau 4.

Tableau 5 (figure 23) : Réduction photosynthétique du CO<sub>2</sub> et de H<sub>2</sub>O

Element par élément				Glucose				
Formule chimique	Masse molaire	Exergie molaire	Exergie massique	Moles de chaque élément	Masse molaire	Exergie molaire	Masse	Exergie massique maximale
	g.mol <sup>-1</sup>	KJ.mol <sup>-1</sup>	MJ.kg <sup>-1</sup>	Formule	g.mol <sup>-1</sup>	MJ.mol <sup>-1</sup>	g.kg <sup>-1</sup>	MJ.kg <sup>-1</sup>
<b>Entrée de réduction (photosynthèse)</b>								
CO <sub>2</sub>	44,010	19,870	0,451	6CO <sub>2</sub>	264,057	0,119	1465,71	0,662
H <sub>2</sub> O	18,015	9,490	0,527	6H <sub>2</sub> O	108,092	0,057	599,99	0,316
<b>Energie libre de Gibbs absorbée (G)</b>						<b>3,738</b>		<b>20,747</b>
Σ G + 6CO <sub>2</sub> + 6H <sub>2</sub> O					372,149	3,914	2065,70	21,725
<b>Sortie de réduction (photosynthèse)</b>								
C	12,011	410,250	34,157	C <sub>6</sub>	72,064	2,462	400,01	13,663
H <sub>2</sub>	2,016	236,100	117,119	H <sub>12</sub>	12,095	1,417	67,14	7,863
O	15,999	1,985	0,124	O <sub>6</sub>	95,996	0,012	532,85	0,066
Σ C <sub>6</sub> H <sub>12</sub> O <sub>6</sub>					180,156	3,890	1000,00	21,592
O <sub>2</sub>	31,999	3,970	0,124	6O <sub>2</sub>	191,993	0,024	1065,70	0,132
Σ C <sub>6</sub> H <sub>12</sub> O <sub>6</sub> + 6O <sub>2</sub>					372,149	3,914	2065,70	21,725

Sources : Szargut, Valero et autres, 2005 ; Loiret, 2013a

Commentaires : Lors de la photosynthèse, nous avons ainsi 6 moles de CO<sub>2</sub> + 6 moles de H<sub>2</sub>O qui sont transformées (réduites), grâce à la « capture » et au stockage de 3,738 MJ d'énergie libre solaire pour une mole de C<sub>6</sub>H<sub>12</sub>O<sub>6</sub> (glucose) et 6 moles de O<sub>2</sub>.

Nous pouvons constater que, avant toute transformation, le gaz carbonique et l'eau ont leur propre niveau d'exergie chimique, soit respectivement 19,87 KJ/mole de CO<sub>2</sub> et 9,49 KJ/mole de H<sub>2</sub>O, et que l'exergie du gaz carbonique est 5 fois plus élevée que celle de l'oxygène libre.

**Avec une remarque fondamentale** : Tel que configuré, ce tableau nous permet de vérifier les principes de conservation de la masse et de l'énergie !

Et plus loin de supposer une corrélation entre exergie et masse, relation qu'avait établie Einstein avec sa célèbre formule, que nous vérifierons de manière absolue (corrélation de 1) dans la synthèse de ce chapitre, quand nous introduirons dans cette transformation les variables de pression et volume constitutive de l'exergie  $pV$ .

La transformation ici étudiée étant la transformation principale de tous les processus de réduction de la Biosphère, nous pouvons en déduire à priori la possibilité de nombreux calculs relatifs aux écosystèmes naturels et à l'économie industrielle. Notons en particulier que l'économie au global, en consommant l'énergie libre de nos ressources, consacre une part significative de cette énergie (autour de 3%) à la transformation de l'oxygène en gaz carbonique.

## 2.2.3 Approche statistique de la diversité

### 2.2.3.1 La diversité au sens statistique

Le terme « diversité » fait historiquement référence à la richesse en espèces d'un écosystème. Puis du concept élémentaire de richesse, la diversité (et avec elle sa mesure) va évoluer dans de multiples directions, à l'exemple du glissement vers le concept de « rareté » d'une espèce, qui va introduire des mesures statistiques plus sophistiquées donnant la probabilité de voir apparaître, dans tel échantillonnage, telle espèce particulière recherchée par un naturaliste.

Mais, comme le disent Hoffmann et Hoffmann (2007), citant Lou Jost dans son article de 2006, *Entropie et diversité* :

La diversité a été confondue avec les indices utilisées pour la mesurer, un index de diversité n'est pas nécessairement lui même une « diversité ». Le rayon d'une sphère est un index de son volume mais n'est pas lui même le volume, et l'utilisation du rayon à la place du volume dans les équations d'engineering donnera des résultats dangereusement erronés. C'est ce que les biologistes ont fait avec les indices de diversité [Hoffmann et Hoffmann, 2007].

Au point que, comme le précisent Hoffmann et Hoffmann, citant cette fois Peet, dans un article de 1974 :

La diversité, en essence, a toujours été définie par les indices utilisés pour la mesurer [Ibid.].

Pour aboutir à cette forme de conclusion :

La question fondamentale qui émerge n'est pas de savoir si ... est une diversité ou non - on ne peut de toute façon y répondre - mais si cette expression mathématique fait sens ou non dans un contexte donné. En d'autres mots, pour reprendre le philosophe Norton (2003) : « Il n'y a pas de définition 'correcte' à 'trouver', car on peut découvrir un diamant sous un rocher. Nous recherchons une définition qui soit utile dans le discours délibératif. Les définitions proposées seront jugées par leur 'utilité' [Ibid.].

Que cherchons-nous à mesurer ? Comment en justifier la mesure ? Ce sont ainsi les questions qui se posent, et nous en déroulerons le petit fil logique.

### 2.2.3.2 Diversités $\alpha$ , $\gamma$ et $\beta$

C'est tout le mérite d'Eric Marcon de nous avoir offert sa très utile synthèse des principales définitions et formules de calcul de la diversité (quoique recueillies sous le titre : *Mesures de la « biodiversité »*) existant à ce jour (Marcon, 2011). Elle constituera une base de référence facilitant nos propos et nous guidant dans le labyrinthe des débats sur le sujet.

Partant de sa définition historique, l'indice de diversité le plus simple et le plus utilisé est donc le nombre d'espèces (habituellement noté  $S$ , nous le noterons  $S_i$ , pour le différencier de l'entropie  $S$ ) ou son logarithme.

On nomme « diversité alpha ( $\alpha$ ) » celle qui mesure le nombre d'espèces pour un habitat uniforme, local, de taille fixe, et « diversité gamma ( $\gamma$ ) » celle qui mesure, à priori, ce même nombre d'espèces à l'échelon supérieur d'un écosystème ou territoire (qui comprend donc un certain nombre de placettes). Ce sont des diversités intra-communautaires.

Diversités  $\alpha$  et  $\gamma$  sont des diversités additives, et donc des variables « extensives ». Notons que la diversité  $\alpha$  est la mesure qui donne le plus d'importances aux espèces rares, puisque toutes les espèces ont la même importance, quel que soit leur effectif en termes d'individus.

La « diversité beta ( $\beta$ ) » est plus subtile, elle est présentée comme un « différentiel » de diversité  $\alpha$  entre deux habitats, ou comme une relation proportionnelle entre diversité  $\alpha$  et  $\gamma$  (diversité inter-communautés).

Selon Marcon, la diversité beta  $\beta$  :

... a été introduite par Whittaker (1960) comme le niveau de changement dans la composition des communautés, ou le degré de différenciation des communautés, en relation avec les changements de milieu. La traduction de cette notion intuitive en une définition sans ambiguïté est encore une question de recherche et de débats [Marcon, 2011].

Et Marcon précise :

... la mesure locale de la diversité  $\alpha$ , et la définition de la diversité  $\beta$  comme rapport des diversités  $\gamma$  et  $\alpha$ , permet de définir *la vraie diversité  $\beta$*  [Ibid. :25].

Pour ensuite synthétiser :

Jurasinski et autres (2009) distinguent plusieurs types de mesures de diversité :

- La diversité d'inventaire, qui traite des données récoltées sur une unité spatiale, ce qui correspond à la définition des diversités  $\alpha$  et  $\gamma$ .
- La diversité de différenciation, qui mesure à quel point les unités spatiales sont différentes, ce qui correspond à la définition de la diversité  $\beta$  donnée plus haut
- La diversité proportionnelle, diversité  $\beta$  qui se construit par différence ou rapport des diversités  $\gamma$  et  $\alpha$ . [Ibid. :26].

Nous avons vu, au paragraphe précédent que le rapport de deux grandeurs extensives donne une grandeur intensive. La diversité  $\beta$ , vue par notre auteur comme la « vraie » diversité, est donc une grandeur « intensive », c'est une diversité de « différenciation ».

### 2.2.3.3 Décomposition des diversités $\alpha$ , $\gamma$ et $\beta$

Abordant les débats entre spécialistes de la diversité, Marcon (2011) nous informe du concept de « décomposition » proposé en 1972 par Whittaker (l'auteur en 1960 de la différenciation des trois types de diversités) selon lequel « la diversité totale  $\gamma$  » devait être le produit des diversités  $\alpha$  et  $\beta$ .

Et en effet, comme il le précise en citant un autre spécialiste :

Lande (1996) note que « la partition (entre diversités  $\alpha$ ,  $\gamma$  et  $\beta$ ) serait plus facilement interprétable si les différentes composantes de la diversité pouvaient être exprimées au moyen de la même formule » [Ibid. :26].

Mais cette question aurait provoqué un débat, assez stérile selon Marcon, pour savoir si l'« agrégation » entre diversités  $\alpha$  et  $\beta$  devait être « additive » ou « multiplicative », et au bout duquel Marcon conclut pour sa part que :

La décomposition multiplicative permet seule la définition de la diversité  $\beta$  en tant que vraie diversité [Ibid. :26]

Rapprochant pour notre part cette question des grandes questions (et solutions) de la thermodynamique classique, elle ne nous semble à l'examen pas aussi stérile que cela.

Car il ne s'agit de rien d'autre dans ce débat, quoique rapporté à la diversité, que de la question entrevue à la sous section précédente relative à la « conjugaison » de grandeurs extensives et intensives.

Nous lui proposerons en temps voulu une solution.

Nous finirons pour le moment de présenter les outils statistiques de la diversité en introduisant les outils fondamentaux utilisés pour la mesure des diversités  $\alpha$ ,  $\gamma$  et  $\beta$

### 2.2.3.4 L'entropie de Shannon : la théorie de l'information pénètre l'écologie

L'indice «  $H$  » de Shannon est, avec l'indice de Simpson, le plus utilisé dans les mesures statistiques. Il est connu pour mesurer la diversité en l'associant à « l'entropie statistique » (Marcon, 2011:22-27). Shannon a vraisemblablement retenu la lettre  $H$  pour faire référence au « théorème H » qui fut démontré par Boltzmann, et lui permit de développer la formule de l'entropie thermodynamique des états microscopiques. On le précise aujourd'hui «  $H'$  », probablement pour le différencier du  $H$  de Boltzmann voir de l'enthalpie  $H$ .

Selon Marcon :

MacArthur (1955) est le premier à avoir introduit la théorie de l'information en écologie (Ulanowicz, 2001). MacArthur s'intéressait aux réseaux trophiques et cherchait à mesurer leur stabilité : l'indice de Shannon qui évalue le nombre de relations possibles lui paraissait une bonne façon de l'évaluer. Mais l'efficacité implique la spécialisation, apparemment pas prise en compte dans  $H$ . MacArthur a abandonné cette voie [Marcon, 2011 :26].

Notons que MacArthur était un élève de Hutchinson, comme les frères Odum. On comprendra mieux plus loin pourquoi Jørgensen, de la même lignée d'écologues, avait repris à son compte des principes établis par ses prédécesseurs.

Shannon est le père de la théorie de l'information, ou plus exactement de la communication, et son indice mesure l'entropie de l'information, que l'on peut voir comme l'usure d'un message lors de sa transcription ou de sa communication. Ainsi le sens (ou la pertinence, ou la force) d'une information s'use tout autant que l'énergie lors

des transformations économiques, ce que notre société de communication démontre tous les jours.

Shannon écrit ainsi son indice au chapitre 6 (choix, incertitude et entropie) de son article fondateur (Shannon, 1948:11) :

$$H' = - \sum_{i=1}^n p_i \log p_i \quad (29)$$

Shannon précise :

$H'$  représente l'entropie de l'information (...) la quantité  $H'$  a un nombre de propriétés intéressantes qui l'étayent davantage comme une mesure raisonnable du choix, ou de l'information.

- $H = 0$  si, et seulement si, tous les  $p_i$  sauf un sont égaux à zéro, celui-ci ayant la valeur un. Sinon  $H$  est positif.
- Pour un nombre  $n$  donné,  $H$  est maximum et égal à  $\log n$  quand tous les  $p_i$  sont égaux (c'est à dire  $1/n$ )<sup>138</sup>. Ce qui est aussi, intuitivement, la situation la plus incertaine [Shannon, 1948:10-11].

Et Marcon ajoute :

$H'$ ... est appelée entropie. C'est une mesure de l'incertitude (de la volatilité) du résultat de l'expérience. Si le résultat est certain, l'entropie est nulle. L'entropie est maximale quand les résultats sont équiprobables [Marcon, 2011:22].

Ce qui signifie que quand  $H'$  tend vers un maximum (l'équiprobabilité), le résultat est de plus en plus improbable et que nous avons un minimum d'information (ou un maximum de désinformation !!) sur le système.

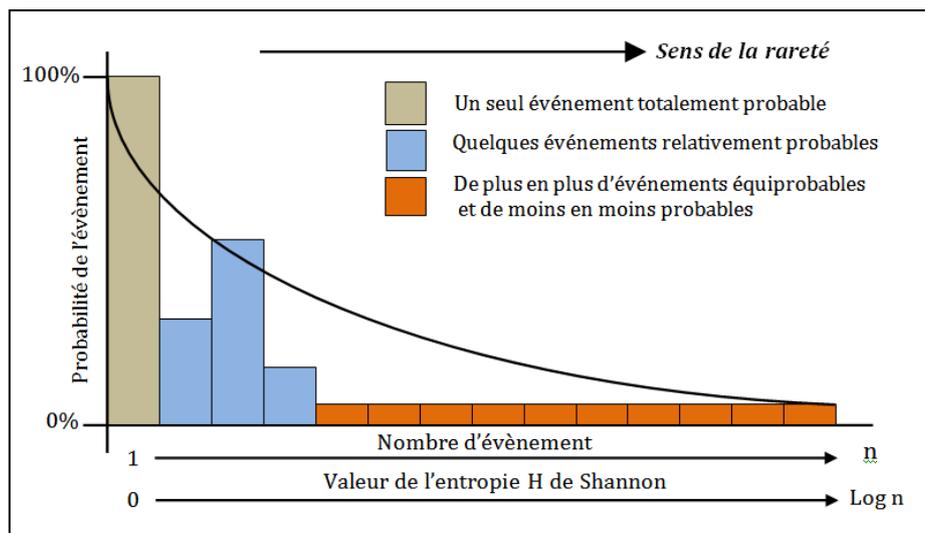
Notons que les mesures classiques de la diversité, pour beaucoup empruntées à l'entropie de Shannon, furent développées autour du concept de « rareté » : rareté d'une espèce, rareté d'un ensemble d'espèces, rareté de la variabilité d'un ensemble d'espèces entre deux placettes, etc.

Cela convergerait parfaitement avec le concept de rareté de l'information : rareté (probabilité d'apparition) d'une lettre dans un ensemble, rareté d'un mot dans un ensemble, rareté d'un ensemble de mots dans un ensemble plus large, etc. Plus la probabilité est faible, plus l'incertitude est grande, plus la rareté de l'information est grande.

L'entropie de Shannon étant ainsi assimilée à la rareté de l'information, illustrons sa formule par un schéma :

---

<sup>138</sup> Ce que Bonsack a démontré en appendice de sa thèse consacrée à cette formule (Bonsack, 1961: Appendice I).

Figure 24 : Illustration de l'entropie statistique  $H'$ , selon Shannon

La rareté commence à la valeur 0, soit la banalité totale. Quand la certitude est totale, il n'existe qu'un seul événement constaté, qu'une seule lettre, qu'une seule espèce ou qu'un seul mot, et sa probabilité d'apparition est égale à 100%.

Ceci nous explique la première des précisions de Shannon accompagnant sa formule, que notre schéma illustre :

$H = 0$  si, et seulement si, tous les  $p_i$  sauf un sont égaux à zéro, celui-ci ayant la valeur un. Sinon  $H$  est positif [Shannon, 1948:11].

Et nous explique à l'opposé la seconde :

Pour un nombre  $n$  donné,  $H$  est maximum et égal à  $\log n$  quand tous les  $p_i$  sont égaux (c'est à dire  $1/n$ ). Ce qui est aussi, intuitivement, la situation la plus incertaine [Ibid.].

Il existe dans ce cas une multitude d'évènements ayant exactement la même probabilité, ce qui est extrêmement rare, incertain et improbable.

Prenons en effet un écosystème avec  $N$  espèces, et  $n$  individus par espèces. Si l'on s'en tient aux « réalités » constatées sur le terrain, il est très improbable de trouver le même nombre d'espèces dans deux placettes différentes, plus encore de trouver le même nombre et les mêmes types d'espèces, et bien plus encore de trouver le même nombre d'espèces, les mêmes types d'espèces et le même nombre d'individus par espèce dans les  $n$  placettes.

Et il en est de même avec les lettres et les mots. Entre deux courriers pris au hasard, l'un en Chine, l'autre au Gabon, il est déjà complètement improbable de trouver dans un des courriers une suite de lettres ou de mots parfaitement identiques entre eux (équiprobables), et infiniment plus identiques dans les deux courriers.

En d'autres mots : il est totalement improbable que la parole n'ait absolument aucun sens !

La formule de Shannon est ainsi parfaitement cohérente (avec elle même), et fonda de ce fait la mesure de l'information, à partir de laquelle, de proche en proche, on estimera la « valeur » de tout message en mesurant sa rareté vue comme un « non sens ».

Et l'on comprend que les biologistes et naturalistes l'aient adoptée comme standard, car elle répondait en tous points à leur concept de rareté.

Nous allons pourtant voir bientôt que cette entropie de Shannon aura posé un immense problème à Jørgensen, en regard d'une mesure de la diversité  $\beta$  ou de la biodiversité.

### 2.2.3.5 L'indice de Simpson : une efficacité entropique mesurée entre 0 et 1

L'indice de Simpson (ou Gini-Simpson) répond à la formule

$$E = 1 - \sum_{i=1}^n p_i^2 \quad \text{et aussi} \quad D = \sum_{i=1}^n p_i^2 \quad (30)$$

Certains auteurs inversent les lettres E et D, et nous garderons pour notre part cette formulation. Parfois interprété comme un indice d'équitabilité, l'indice de Simpson est tout aussi utilisé que celui de Shannon et a le même sens. Sauf à être compris entre 0 et 1 quand l'autre est compris entre 0 et  $\log n$ , il augmente lui aussi avec le nombre d'espèces et devient maximum à l'équilibre. Pour imiter Shannon, nous pouvons dire :

- $E = 0$  si, et seulement si, tous les  $p_i$  sauf un sont égaux à 0, celui-ci ayant la valeur 1. Sinon  $E$  est positif.
- $E$  est maximum et égal à 1 quand tous les  $p_i$  sont égaux (c'est à dire  $1/n$ ) et  $n$  est infini.

Mesurant lui aussi l'entropie par « un rapprochement de l'équilibre », il nous posera cependant le même problème que l'indice de Shannon par rapport à l'entropie de Boltzmann et une mesure thermodynamique du vivant.

Mais cela n'empêche pas les principes mathématiques ayant fondé sa mise au point, son « principe de mesure », notamment pour « D », d'être une « perfection » sur laquelle nous nous appuierons pour bâtir nos propositions alternatives. Etant par ailleurs compris entre 0 et 1, il nous donnera un « indice d'efficacité » le rendant partout comparable à une autre mesure.

## 2.3 Exergie et biodiversité : Solutions et problèmes d'aujourd'hui

### 2.3.1 L'exergie versus les deux principes biogéochimiques

Avec l'énergie biogéochimique *constitutive* du vivant et l'énergie géochimique biogène *issue* du vivant, les fonctions (redox) de la Biosphère à la fois concordait avec les exposés préliminaires du second principe de Clausius, et contredisaient la conclusion qu'il en tirait.

Les deux principes de Vernadsky nous offraient les fondements d'une nouvelle mesure du travail de la nature, et d'une thermodynamique du vivant, expliquant enfin ces processus de production de valeurs d'usage si chers à la Physiocratie, à Podolinsky, et aussi à Marx et Engels, même si ces derniers adoptèrent finalement un point de vue ignorant les valeurs d'usage au profit des valeurs d'échange.

La première de ces deux formes d'énergie, l'énergie biogéochimique, était cette fois vraiment « biophysique », en ce qu'elle traduisait directement les différentiels de potentiel chimique du niveau cellulaire, formateurs de la « masse organique ».

Ainsi, l'énergie incorporée à leur composition chimique par les organismes vivants, en même temps leur donnait forme et générait un tout qui était à la fois « énergie et masse », organiques.

Quant à la seconde forme d'énergie, l'énergie géochimique des matières biogènes, la formulation élargie du second principe biogéochimique disait bien :

Lors de l'évolution des espèces, la composition chimique de la matière vivante demeure constante, mais l'énergie géochimique biogène apportée par la matière vivante dans le milieu cosmique s'accroît [Vernadsky, 1930:12].

Cette nouvelle énergie matérielle, produite par le vivant, anticipait de 30 ans sa formulation moderne, l'*exergie* (tableaux 4 et 5, formule 28), définie dès 1956 et appliquée pour des mesures concrètes à partir de 1976 (Eriksson & Wall, 1976).

L'exergie rendait ainsi parfaitement compte du contenu en énergie libre des matières biogènes de l'écorce terrestre et des compartiments de la Biosphère.

Elle fera comme telle l'objet d'une normalisation (Szargut et autres, 2005), qui permettra à certains chercheurs de mesurer très précisément le niveau d'énergie libre incorporé dans tous les éléments et composés minéraux chimiques (matériaux *biogènes*) de la Biosphère, à l'exemple de Chen (2004), Huang et autres (2005), Valero Delgado (2008), Chen et autres (2009).

Elle rendait compte par ailleurs des processus entropiques de l'économie (Georgescu-Roegen, 1971, 1979), ce qui permettra à d'autres chercheurs, à l'exemple de Wall (1977, 1986, 1994, 2001), Schilizzi (1987), Jorge & Bakshi (2005), de suivre le parcours de dégradation de l'énergie au long des processus de production agricoles et industriels, y compris en utilisant l'analyse Input/Output développée par Leontief (1973).

A ce stade, l'exergie accomplissait déjà une grande partie du rêve de Podolinsky en rendant compte des critiques d'Engels.

Elle mesurait non seulement l'énergie géochimique biogène produite par les organismes vivants et les écosystèmes, mais aussi celle consommée par l'économie ; elle autorisait ainsi, a priori, un rapprochement étroit entre une théorie de la production

énergétique et une théorie de formation de la valeur économique. Ce qui avait été la grande ambition de Podolinsky, et redevint partie de la thèse de Schilizzi (1987), significativement dirigée par Ignacy Sachs (1979, 2007).

Et c'est ainsi que, malgré ses limites initiales, qu'avait montrées Odum (1996), l'*exergie* devança progressivement l'*émergie*, aux ambitions parallèles, quoiqu'elle ne fût jamais considérée contradictoire à cette dernière (Silow & Mokry, 2009).

Et ceci jusqu'à ce que, étudiée dans le cadre d'un programme mondial de soutenabilité ayant pour objectif de mesurer sur une base thermodynamique l'impact de l'homme sur la biodiversité, elle apparaisse pour la CBD, comme le concept énergétique le plus prometteur, et potentiellement à même de rendre compte de la biodiversité.

Jusqu'ici, les scientifiques ont apporté un cadre théorique pour la thermodynamique des écosystèmes (Holling, 1986; Jørgensen, 1992; Schneider & Kay, 1994; Kay & al., 1999; Kay, 2000). Les tentatives réalisées pour adjoindre des indicateurs mesurables d'efficacité en *exergie* des écosystèmes à cette théorie, nous ont menés au plus près d'une définition de la capacité et des limites des écosystèmes globaux (Jørgensen 2006) [CBD, 2010:186].

Mais pourtant, comme le montrera la suite de cette citation (cf. citation complète au paragraphe 1.1.6.), l'*exergie* ne satisfaisait pas entièrement aux objectifs de la CBD, et rencontrait certaines limites qui deviendront bientôt manifestes en tentant d'appliquer sa mesure aux organismes vivants et aux écosystèmes.

Mais nous n'aborderons pas de suite le contenu des propositions scientifiques qui avaient rendu manifestes ces limites aux yeux de la CBD.

Nous resituerons auparavant ce problème dans le cadre de notre propre recherche épistémologique, telle que nous l'avons entreprise dans la première section de ce chapitre.

Revenons pour ce faire aux principes de Vernadsky et à la distinction qu'il établissait entre nos deux formes d'énergie (paragraphe 2.1.6.6.).

L'énergie *biogéochimique* (que Vernadsky nomme aussi parfois *énergie géochimique de la matière vivante*) représente comme nous l'avons vu l'énergie libre en tant qu'elle est incorporée dans une nouvelle matière, entièrement différente de la matière inerte.

Avec l'endosymbiose, les organismes vivants ont intégré dans l'enveloppe thermodynamique de leurs cellules eucaryotes (puis dans des enceintes de plus en plus larges les isolant de plus en plus efficacement de la matière inerte) les fonctions de réduction néguentropique et d'oxydation entropique (fonctions redox), anciennement assurées par des espèces distinctes de bactéries primitives (Margulis, 1986).

Et ceci dans une symbiose telle de l'énergie et de la matière dans l'énergie biogéochimique, que la matière vivante semblerait vérifier l'équivalence entre masse et énergie énoncée par Einstein ; ce que nos compléments sur la stœchiométrie du glucose (tableau 7) tendraient à montrer.

L'énergie *géochimique biogène* est aussi une énergie spécifique au vivant, mais essentiellement un « sous-produit » de son métabolisme général, soit tous les éléments gazeux, liquides et solides qu'il rejette, jusqu'à son propre corps après sa mort. Et tels qu'ils ont été ensuite dispersés dans les compartiments de la Biosphère, par oxydation ou réduction, pour imprégner d'énergie libre leurs différentes composantes matérielles, et ainsi modifier les variables thermodynamiques de pression et volume de ces compartiments.

Ce qui aura formé tous les stocks de matière *biogène* de la Biosphère, à l'exemple de l'oxygène libre, de l'eau libre en phase liquide, des stocks de carbone fossiles et des différents minéraux concentrés de la lithosphère superficielle ou profonde (calcaire, fer, ...).

Si nous adoptons le terme moderne de cette énergie, il existait ainsi pour Vernadsky « deux » formes d'*exergie* parfaitement distinctes, dont la différence, plus qu'essentielle, marquait la frontière entre la matière *biogène* et la matière *vivante*.

Il est clair que l'étude de l'*énergie biogéochimique* est le problème essentiel pour la compréhension de la vie et de son rôle dans le Cosmos. Mais elle n'est pas évaluée habituellement et les notions qui lui correspondent n'ont pas pénétré la mentalité des naturalistes [Vernadsky, 1932:4].

Qu'est-ce donc de fondamental qui pourrait distinguer, dans une mesure biophysique continue, ces deux types d'exergie ?

## 2.3.2 Quatrième principe et théorie de l'information

### 2.3.2.1 L'information comme fonction non hasardeuse du vivant

Lotka avait mis le doigt sur cette question dans son second article de 1922 (Lotka, 1922b). Entre la doctrine vitaliste d'une intervention de l'esprit sur la matière, et la doctrine hasardeuse du second principe, il avait supposé, en s'appuyant sur Guillemot, l'intervention d'un tiers, la capacité de *choix* des êtres vivants, qui induisait une information d'autant plus structurée que ces choix étaient performants dans la production d'énergie utile et de distance à l'équilibre.

Lotka permettait ainsi de préciser le contenu du quatrième principe, dans sa partie afférente à l'Ecosphère, que nous avons déjà évoqué : le concept d'information relatif à l'évolution des espèces.

Il approfondissait un problème qui n'avait pas échappé à Vernadsky, mais que ce dernier n'eut d'évidence, après son retour en URSS, plus le temps et/ou les moyens de traiter.

Raison pour laquelle il en confia la tâche à un des ses proches ....

### 2.3.2.2 I.I. Schmalhausen et les champs d'information de l'Ecosphère

Ivan Ivanovich Schmalhausen (1884–1963), ce biologiste évolutionnaire russe à l'origine de la grande *synthèse évolutionnaire*, qui avait été le meilleur disciple de Sewertzoff, fut aussi, comme nous l'avons vu, un des proches de Vernadsky depuis la révolution d'octobre.

Levit, Hossfeld & Olsson (2006) nous apprennent que déjà fortement influencé par la théorie de la Biosphère, Schmalhausen s'était impliqué dès la fin de la seconde guerre mondiale, à partir des discussions qu'il avait eues avec Vernadsky en 1944, à Borovoje (paragraphe 2.1.5.1.), dans des travaux approfondis cherchant à expliquer par la *Cybernétique* la fonction régulatrice des cycles biogéochimiques au sein des biogéocénoses.

Schmalhausen voyait la biogéocénose comme le facteur central de stabilisation dans l'évolution : « Ainsi, on peut révéler dans ce cas l'interconnexion intime entre le régulateur (biogéocénose) et l'objet à réguler (population) » (Schmalhausen, '68, p 40). Le phénotype se fait le médiateur du flux d'information entre la population et la biogéocénose. La lutte pour la survie, les ressources et le succès de la reproduction configure le flux d'information. Par ailleurs, chaque phénotype peut être vu comme une somme de « signaux » et de « symboles » (coloration, odeur, forme, etc.) utilisés pour la communication entre les espèces et entre une espèce et son environnement. Ceci contribue au champ d'information d'une biogéocénose. En résumé : « Les individus de toutes espèces influencent la biogéocénose avec toutes leurs activités et l'informent ainsi quant à l'état de la population » (Schmalhausen, '68, p 48). La biogéocénose contrôle les phénotypes à *tous* les stades

de leur cycle de vie par la dynamique des ressources disponibles pour la compétition des individus à l'intérieur d'une population (...) Les processus macro-évolutionnaires tendent à augmenter le niveau du changement évolutionnaire. L'interaction des mécanismes micro et macro évolutionnaires donnent l'accès à divers modes d'évolution. Schmalhausen voyait la sélection naturelle comme le résultat d'un système complexe d'autorégulation des biogéocénoses [Levit, Hossfeld & Olsson, 2006:11/18].

Déjà champ « thermodynamique », la biogéocénose était donc aussi un champ « d'information » reliant et intensifiant les relations interspécifiques et avec elles l'énergie biogéochimique du vivant.

Schmalhausen avait ainsi développé l'« appendice cybernétique » de la théorie de la Biosphère (somme des biogéocénoses, au sein de l'Ecosphère, au sein de la Biosphère), qui montrait bien comme tel qu'elle était un système autorégulé<sup>139</sup> en direction de sa distance à l'équilibre.

Et c'est en développant les concepts d'une cybernétique appliquée aux biogéocénoses, qu'il renversa l'a priori négatif des autorités soviétiques vis à vis de cette « science bourgeoise ».

Ce qui bouclait la théorie de la Biosphère avec une théorie de l'information, *partie du quatrième principe*, qui avait vocation à caractériser l'intensification de l'énergie biogéochimique au sein des organismes vivants, au long de l'évolution des espèces.

### 2.3.2.3 Une information du vivant propre à l'énergétique de l'évolution

Schmalhausen avait mis en exergue les flux d'information échangés au sein des biogéocénoses de l'Ecosphère, et avec eux la transmission de blocs d'information, vus comme autant d'*unités héritables* dont Mendel avait publiées en 1866 les premières lois, et que le biologiste danois Wilhem Johannsen avait appelées gènes en 1906<sup>140</sup>.

Une information qui serait donc à mettre strictement en rapport avec l'intensification énergétique des organismes (aromorphose) de l'Ecosphère, au long de l'évolution des espèces.

Et qui serait ainsi une composante structurelle de la production d'énergie biogéochimique des organismes en voie de croissance et complexification, depuis l'organisation moléculaire, cellulaire et organique, jusqu'aux réseaux d'organismes des biogéocénoses.

Soit une « information-structure » de l'énergie, qui rendrait l'énergie *biogéochimique* et la matière vivante de moins en moins distinctes, et établirait une relation de plus en plus étroite entre énergie biogéochimique, complexité et biodiversité.

Schmalhausen nous confirmait ainsi que Lotka avait mis le doigt, dans son second article de 1922, sur un critère qui avait vocation à strictement différencier l'énergie

---

<sup>139</sup> Autorégulation de la Biosphère que Lovelock (1973, 1979) aura repris à son compte pour développer le noyau de « son » hypothèse Gaïa.

<sup>140</sup> Quatre décennies avant que Schrödinger (1944) formule l'idée de *code génétique*, dans ces mêmes années de la seconde guerre mondiale où furent développés en Angleterre les premiers grands calculateurs, avec la participation notable de Jay Forrester (1961, 1968). Une évolution qui convergera sur la théorie de l'information (Shannon, 1948) et les premiers ordinateurs développés au MIT. Jusqu'au *Modèle du monde* de Forrester (1971), qui alimentera la réflexion de base du *Club de Rome* sur la croissance, préalable à la CNUED de 1972.

*biogéochimique de l'énergie géochimique biogène*, et avec elles une exergie propre à la matière biogène, et une autre spécifique au vivant.

Revenant à Lotka, celui-ci avait pu ainsi aborder la fin de son second article de 1922 en revenant sur les conclusions du précédent (Lotka, 1922a, cf. paragraphe 2.1.3.), où il précisait les champs d'étude de l'évolution à développer.

Voyant l'évolution comme un changement de distribution de la matière parmi les composants d'un système physique, l'étude de l'évolution se divise elle-même en deux champs. Le premier, qui doit être nommé la *stœchiométrie* de l'évolution, fait appel aux relations de masse : les quantités relatives de différentes espèces de matière présentes, et le changement de ces quantités, la *cinétique* de l'évolution. Le second champ d'étude est la *dynamique* ou *l'énergétique* de l'évolution, dont le champ d'étude est suffisamment indiqué par ces termes [Ibid., p. 4/4].

La stœchiométrie de l'évolution faisait clairement appel à cette composition chimique de la matière vivante, qui demeure constante lors de l'évolution des espèces, mais dont l'énergie géochimique biogène s'accroît avec la matière vivante dans le milieu cosmique.

Le premier des champs cités par Lotka faisait donc clairement référence à la différence entre les espèces, à leur diversité structurale, soit au caractère informationnel de l'évolution.

Le second ne concernait que l'énergétique de l'évolution.

C'est à dire deux champs d'étude, aux nombreux recouvrements, qui se trouvaient exactement couverts par les deux principes de Vernadsky, que devrait couvrir le quatrième !

#### **2.3.2.4 Thermodynamique irréversible et théorie de l'information**

Quarante ans après, le problème que posait Lotka n'aura pas du tout échappé à Von Bertalanffy, alors qu'il constatait l'absence d'une loi physique affirmant que l'évolution se ferait vers une plus grande organisation, c'est à dire vers l'improbable, et donc à contresens de la *Flèche du temps*.

Parmi les grands problèmes non résolus faisant directement suite à l'absence de cette loi physique, il y citait en effet celui du lien existant entre la thermodynamique irréversible et la théorie de l'information. L'ordre pouvant être mesuré par une entropie négative au sens conventionnel de Boltzmann, cela mettait en évidence une correspondance entre les deux systèmes théoriques différents que sont la thermodynamique et la théorie de l'information, et donc une contradiction apparente entre physique et biologie. Le principe physique de l'entropie serait-il opposé au principe biologique de l'adaptation et de l'évolution ? L'ordre étant le fondement de l'organisation, il s'agissait pour lui du problème le plus fondamental de la biologie (Von Bertalanffy, 1968:155-157).

Nous reviendrons amplement sur cette contradiction, au cœur de notre problématique.

#### **2.3.3 L'exergie versus l'énergie biogéochimique du vivant**

Vernadsky avait précisé que l'étude de l'énergie géochimique de la matière vivante, soit l'énergie *biogéochimique*, était le problème essentiel pour la compréhension de la vie et de son rôle dans le Cosmos.

Mais qu'elle n'était pas évaluée et que les notions qui lui correspondaient n'avaient pas pénétré la mentalité des naturalistes.

Que ces notions aient pénétré depuis la mentalité des naturalistes, cela ne fait aucun doute ; comme en témoignent tous les travaux sur l'exergie développés depuis, et comme en témoignent, 88 ans après les mots de Vernadsky, l'extrait du document de la CBD (2010) du paragraphe précédent.

Mais que l'énergie *biogéochimique* soit « évaluée », c'est un autre problème !

Schilizzi (1987) avait déjà noté dans les conclusions de sa thèse qu'il y avait un problème avec l'exergie ; tout en rendant compte du second principe, elle manifestait un manque qu'il rapportait à certaines distorsions entre le concept d'entropie et la notion d'information :

Il nous manque une théorie cohérente de la production de valeur-ajoutée. Une telle théorie devrait faire intervenir simultanément les concepts de travail physique, que nous avons développé au cours de cette étude, et de travail informationnel, encore rebelle à l'analyse (...) Dans le processus de production d'un produit, les matières premières peuvent être considérées comme contenant peu d'information (ou une entropie élevée), alors que le produit est « informé ». Cependant ces mêmes matières premières, vues comme des ressources naturelles devant être dégradées avant de finir leur vie à l'état de déchets, apparaissent comme étant « naturellement » structurées et riche en néguentropie (...) relativement aux déchets « déstructurés » rejetés dans l'environnement. Manifestement, l'emploi du concept d'entropie dans son sens informationnel pose problème et s'avère peut-être inadéquat ou appliqué trop superficiellement. Ou alors il faut supposer que le produit consommé et rejeté dans l'environnement « charrie » avec lui plus d'entropie que n'avait été prélevée de néguentropie à titre de ressources naturelles, la production nette d'entropie pouvant venir du maintien et du renouvellement des structures productives [Schilizzi, 1987:416].

Il y avait ainsi comme un « contresens », encore relativement vague et indéterminé, entre la notion d'entropie au sens thermodynamique et cette même notion au sens de la théorie de l'information.

Plus tard, les applications initiales de l'exergie (que nous avons entrevues) causèrent de grandes discussions chez les écologues (Silow & Mokry, 2009), et Odum, qui avait longuement testé le concept montra les limitations des approches initiales de l'exergie appliquée aux écosystèmes (Odum, 1996).

Mais il faudra attendre encore plus de dix ans pour que ce problème apparaisse plus nettement au regard des organisations internationales en charge de la biodiversité.

Comme le soulignait la suite de notre citation de la CBD (paragraphe 1.1.6.) :

Les tentatives réalisées pour adjoindre des indicateurs mesurables d'efficacité en *exergie* des écosystèmes à cette théorie, nous ont menés au plus près d'une définition de la capacité et des limites des écosystèmes globaux (Jørgensen 2006).

Cependant, il y a encore des lacunes dans le modèle qui échouent à rendre un juste compte des échelles spatiales et temporelles de la biodiversité. Les héritages historiques et environnementaux de la biodiversité, telle que configurée à travers les paysages, nous fournissent la connectivité, et contribuent à des propriétés émergentes qui sont difficiles à catégoriser en utilisant les principes de la thermodynamique [...] Un concept unificateur de la durabilité combinerait les principes de la théorie des écosystèmes et de la biodiversité structurale [CBD, 2010:186].

Nous retrouvons là les relations établies par Lotka et Schmalhausen entre la thermodynamique des écosystèmes et les aspects informationnels de la biodiversité, structurant les relations au sein des biogéocénoses.

Quant aux lacunes que cette approche connaissait, elles ressortaient parfaitement de la comparaison des deux citations précédentes (Schilizzi et CBD).

Une problématique que nous pouvons formuler comme l'existence de « propriétés émergentes », propres aux ressources naturelles et à la biodiversité du vivant (structure,

richesse en négentropie, complexité de l'information), que la thermodynamique s'avérait impropre à caractériser.

Ces deux citations se référant au même concept d'exergie, qui déjà rendait compte du second principe, cela mettait tout particulièrement en relief cette lacune des principes classiques de la thermodynamique au regard du vivant, que Lotka avait soulignée 90 ans auparavant.

A croire qu'il n'y aurait qu'un *quatrième principe* pour régler ce problème.

Pour approfondir cette question, nous porterons maintenant notre attention sur Jørgensen, dont le nom apparaissait plusieurs fois dans la citation de la CBD (cf. paragraphe 1.1.6. la citation complète), et qui était notamment cité en référence à une *théorie des écosystèmes*.

Elle fut exposée par cet auteur et ses partenaires dans *A New Ecology. Systems Perspective* (Jørgensen et autres, 2007), à la suite de nombreux travaux consistant à mesurer la biodiversité des écosystèmes au moyen d'un concept d'exergie spécifique au vivant.

### 2.3.3.1 S. E. Jørgensen et l'éco-exergie

Sven Erik Jørgensen (1934-...) est un écologiste et chimiste danois, né à Copenhague. Titulaire de deux doctorats, en Ingénierie environnementale et Modélisation écologique, il a publié un grand nombre d'articles dans les revues internationales ainsi que d'ouvrages spécialisés. Titulaire de nombreux prix internationaux dont le Prix Prigogine et la Médaille Pascal, il a fondé en 1975 le journal *Ecological Modelling* et en 1978 l'*International Society of Ecological Modelling* (ISEM). Il est aujourd'hui Professeur émérite à l'Université de Copenhague, Président d'ISEM et membre de l'Académie Européenne des Sciences.

C'est par ailleurs un membre éminent de *Systems Ecology*, un champ interdisciplinaire de l'Ecologie, qui a centré l'attention sur l'étude, le développement et l'organisation des écosystèmes, en promouvant une vision « holistique » des interactions et transactions à l'intérieur et entre les systèmes écologiques et biologiques, incluant le rôle de l'homme.

On trouve dans ce mouvement d'autres grands spécialistes de l'écologie et des écosystèmes, comme Robert Costanza, Paul Falkowsky, Ramon Margalef et Robert Ulanowicz. Et surtout Howard T. et Eugène Odum, tous deux disciples de Hutchison, qui furent les initiateurs principaux de *Systems Ecology* (Odum, 1983).

Howard Odum notamment, soutenu par son frère, avait lui aussi, après Podolinsky, fait avec son concept d'énergie<sup>141</sup> une remarquable tentative de réalisation d'une théorie biophysique de formation de la valeur monétaire (Odum, 1991, 1996, 2000).

Les membres de *Systems Ecology* s'inscrivent ainsi peu ou prou dans le grand mouvement anglo-saxon d'écologie scientifique lancé après la seconde guerre mondiale par Hutchinson, suite aux initiatives séminales de Lotka, dans ce contexte de fracture Est-Ouest qui a montré toute l'ambiguïté des relations Lotka-Vernadsky.

Cela nous permet d'établir une filiation des idées de Jørgensen, qui incarnerait de nos jours la reconnaissance mondiale (ne serait-ce que des grandes organisations

---

<sup>141</sup> Un concept proche de l'exergie par son ambition de signifier, avec « l'énergie libre incorporée » dans et par la matière vivante (les *solar energy embodied joules*, ou *emJoules* ou *sej*), le travail des forces naturelles de la Biosphère nécessaire à cette production énergétique du vivant, et sa consommation par l'économie.

internationales liées à l'ONU) d'une *direction de l'évolution* primitivement formalisée, « en Amérique », par Lotka.

Jørgensen a ainsi développé pas à pas, depuis la fin des années 70, dans le contexte d'une *théorie des écosystèmes* qui traduirait cette directionalité de l'évolution, un nouveau concept d'exergie propre aux organismes vivants, l'*éco-exergie* (Jørgensen et autres, 2004).

Il avait suggéré dès 1977 avec un de ses partenaires que la *directionnalité*, dans la *succession* écologique, soit quantifiée par la quantité d'exergie stockée dans les composants d'un écosystème (Jørgensen et Meyer, 1977).

L'hypothèse de travail était que les écosystèmes accumulent de plus en plus d'exergie au long de leur maturation, et que cette exergie pouvait être estimée une fois que l'on connaîtrait la densité de masse des différentes espèces composant un écosystème, ainsi que le potentiel chimique et la complexité génétique de ces espèces (Jørgensen et autres, 2007:74-75).

Jørgensen a ainsi mis progressivement au point un indice de complexité supposé traduire la complexité génétique des espèces qu'il a nommé « facteur  $\beta$  »<sup>142</sup>.

Lié à l'ADN, il est supposé refléter le niveau d'information des organismes qui, au delà de leur seule mesure en exergie (comme celle d'un simple morceau de bois), a vocation à être parfaitement corrélé à la complexité de leur structure interne acquise au cours de l'évolution (Jørgensen et autres, 2004).

Les facteurs  $\beta$  rendraient ainsi compte de la relation directe qu'établissait l'aromorphose entre la complexité structurale de la biodiversité et la montée en pression (variable intensive) de l'énergie au long de l'évolution.

Combiné à l'exergie, et comme l'émergie d'Odum<sup>143</sup> avait vocation à le faire, il ferait de l'éco-exergie un étalon significatif de la complexité des organismes, en mesurant leur « intensité énergétique » spécifique.

L'éco-exergie est donc le produit de la conjugaison de la mesure standard en exergie relative à la masse des organismes étudiés, avec le facteur  $\beta$  de leur espèce.

Elle se veut ainsi beaucoup plus significative du vivant que la seule exergie, qui représente comme nous l'avons vu l'énergie géochimique biogène (formule (28)).

Passons maintenant aux travaux de Jørgensen et de son équipe portant sur les lois générales déterminant l'évolution des organismes et écosystèmes.

---

<sup>142</sup> La lettre beta semble faire référence à la notion de « diversité beta ( $\beta$ ) ».

<sup>143</sup> Après les critiques initiales d'Odum à propos de l'exergie (Odum, 1996), et après la mise au point des facteurs  $\beta$  par Jørgensen, les apports similaires mais différenciés de l'émergie et de l'éco-exergie ont été comparés (Jørgensen, Odum et Brown, 2004). Il semble finalement que le concept d'émergie a été abandonné par les organisations internationales au profit de l'éco-exergie, après le décès de H.T. Odum (2002) ; l'exergie était déjà d'un caractère géochimique et thermodynamique beaucoup mieux fondé, et la composante informationnelle de Jørgensen a semblé la compléter pour en faire la mesure de demain. C'est une des raisons pour lesquelles nous ne développerons pas en détail, malgré tout son intérêt, le concept d'émergie, sauf à faire des comparaisons ponctuelles utiles à notre exposé.

### 2.3.3.2 Une nouvelle Théorie des écosystèmes

Jørgensen avait progressivement déduit de ses réflexions fondamentales et de ses travaux d'application les concepts intégrés d'une nouvelle *théorie des écosystèmes* (Jørgensen, 2006).

En 2007, il en aura déduit avec ses partenaires un ensemble de lois écosystémiques établissant les grands principes de fonctionnement thermodynamique et de production énergétique des écosystèmes (Jørgensen et autres, 2007).

*A New Ecology, Systems perspective* présente ainsi globalement ces grands principes :

Après la capture initiale d'énergie à travers une frontière, la croissance et le développement des écosystèmes est possible par (1) une augmentation de structure physique (biomasse), (2) une augmentation du réseau (plus de recyclage)<sup>144</sup>, et ensuite (3) une augmentation du niveau de l'information incorporée dans le système. Ces trois formes de croissance impliquent que le système est en train de se mouvoir loin de l'équilibre thermodynamique (Jørgensen et autres, 2000), et ces trois formes sont associées avec une augmentation de (1) l'éco-exergie stockée et (2) du flux d'énergie qui traverse le système (sa puissance). Quand les flux de recyclage augmentent, la capacité de stockage de l'éco-exergie, l'efficacité d'utilisation de l'énergie et la différenciation espace-temps se développent tous ensemble (Ho et Ulanowicz, 2005) [Jørgensen et autres, 2007:247].

Ces principes étendaient la structuration et la complexification endogène des organismes à l'échelle des écosystèmes, avec pour conséquence notable de rendre la biodiversité parfaitement corrélable avec la mesure en éco-exergie des écosystèmes.

L'énergie biogéochimique, devenue éco-exergie, mesurerait ainsi la distance à l'équilibre des organismes vivants, et plus largement celle des écosystèmes.

Ce qui traduisait parfaitement le second principe biogéochimique, qui étendait la directionalité de l'aromorphose aux biogéocénoses de l'Ecosphère. Ce dont les BMC (Biotic Matter Cycle) illustraient l'application.

*A new ecology* avait ainsi vocation à recueillir, en forme de bassin versant, tous les apports et acquis de la biologie évolutionnaire et de l'écologie américaine au regard de la thermodynamique ; et de caractériser notamment une nouvelle *thermodynamique des écosystèmes*, élargissant plus encore la thermodynamique au vivant, après les apports fondamentaux de Prigogine en la matière.

Jørgensen et ses partenaires formulèrent ainsi les dix grandes lois caractérisant les écosystèmes comme des systèmes thermodynamiques (Jørgensen et autres, 2007 ; Silow, Mokry et Jørgensen, 2011) :

1. Les principes de conservation de la masse et de l'énergie sont valides pour les écosystèmes.
2. Tous les processus écosystémiques sont irréversibles et sont accompagnés d'une production d'entropie et une destruction d'exergie<sup>145</sup>.
3. Tous les écosystèmes sont des systèmes ouverts incorporés dans un environnement duquel ils reçoivent des entrées d'énergie-matière et dans lequel ils déchargent des sorties d'énergie-matière.
4. Les écosystèmes ont de multiples niveaux d'organisation et opèrent hiérarchiquement.

---

<sup>144</sup> Jørgensen fait ici référence à la notion de « cycle biotique », voir plus loin.

<sup>145</sup> Observons au passage que cette loi (ainsi que la suivante) vise à rendre compte de la théorie des structures dissipatives de Prigogine.

5. Les composants d'un écosystème forment un complexe interactif, un réseau écologique auto-organisé.
6. La vie sur Terre, basée sur le carbone, a une base biochimique caractéristique que tous les organismes partagent.
7. Thermodynamiquement, la vie basée sur le carbone a un domaine de viabilité déterminé, entre 250 et 350 °K environ.
8. Après la capture initiale d'énergie à travers une frontière, la croissance et le développement des écosystèmes sont rendus possibles par (1) une augmentation de la structure physique (biomasse) (2) une augmentation du réseau (plus de recyclage) (3) une augmentation de l'information incorporée dans le système.
9. Les processus biologiques utilisent l'énergie capturée (entrée) pour se mouvoir loin de l'équilibre thermodynamique et maintenir un état de basse entropie et de haute exergie relatifs à leur environnement et à l'équilibre thermodynamique.
10. S'il est offert à l'écosystème plus de voies ou de combinaisons de voies propres à s'éloigner de l'équilibre thermodynamique, alors les combinaisons de voies qui permettront au système de s'éloigner le plus loin de l'équilibre thermodynamique (dont le rendement en éco-exergie sera le plus important) l'emporteront sur les autres.

Un ensemble de lois qui a le grand mérite d'exister.

Mais pour lesquelles Jørgensen et ses partenaires se trouvèrent quand même obligés, après la parution anglaise de *The biosphere* (Vernadsky, 1998), de rendre compte des travaux préliminaires de Vernadsky :

Quelques unes de ces lois furent connues beaucoup plus tôt (la 1<sup>ère</sup>, la 3<sup>ème</sup>, la 4<sup>ème</sup> et la 5<sup>ème</sup> furent proposées par W.I. Vernadsky en 1929), mais l'ensemble des dix lois a été créé par S.E. Jørgensen. [Silow, Mokry et Jørgensen, 2011:3].

Quoi que si nous devons reprendre ces lois au regard de tous les acquis de notre école russe de la directionnalité (Sewertzoff, Schmalhausen, Berg, Sukachov et Vernadsky pour le moins), il apparaîtrait bien vite que ce ne ce sont pas quatre, mais au moins huit parmi ces dix lois qui furent directement ou indirectement formulées près d'un siècle auparavant. La dixième loi notamment n'étant qu'une expression particulière du second principe biogéochimique.

Ceci pour simplement rendre à César ce qui, en principe, lui appartient, sans plus s'attarder sur une question déjà suffisamment débattue.

Ceci dit, ces lois ne nous disent rien des systèmes « clos » (BMC), spécifiques aux biogéocénoses, et tels que modélisés par les chercheurs russes Gubanov et Degermendzhy (2008).

D'où l'impasse<sup>146</sup> sur une notion que les BMC illustrent de manière particulièrement explicite, les fonctions « redox » du vivant, combinant réduction & oxydation, par lesquelles les biogéocénoses optimisent l'utilisation et le recyclage des matières biogènes, provenant y compris du *socle géologique* de l'écosystème, pour intensifier la production d'énergie biogéochimique et le stockage de l'énergie libre (cf. paragraphe 2.1.7.1.).

Ce en quoi les BMC peuvent caractériser tout aussi bien la diversité biologique des biogéocénoses, que la fertilité biologique de leur sol, en interaction avec la roche mère.

---

<sup>146</sup> Impasse qui s'explique très bien par la différence, mineure à priori, majeure à postériori, entre les notions américaines d'*écosystème* et russes de *biogéocénose*.

Nous verrons qu'un tel manque est dommageable à une juste caractérisation de l'énergie géochimique des organismes vivants, dont la fonction redox est probablement le tout premier des critères susceptibles de caractériser une « thermodynamique des écosystèmes ».

Nous chercherons ainsi à montrer que la biodiversité et la distance à l'équilibre des écosystèmes ne résulte pas de la seule augmentation d'entropie « ou » de néguentropie, mais qu'elle est le seul résultat combiné de leur interaction étroite.

Et d'où aussi cette autre impasse sur la fonction spécifique d'accumulation énergétique du système en voie de clôture des biogéocénoses qui, au delà du seul stockage d'énergie géochimique des organismes vivants, fait sortir du cycle biotique ses produits finaux inertes, les *Deadlock*, (cf. figure 14 et commentaires) qui s'enfoncent ensuite dans la lithosphère pour atteindre les couches les plus profondes de la croûte terrestre.

Cette fonction de stockage dynamique apparaissait seule opposable au principe de Clausius, et avait pour caractéristique remarquable, en faisant parcourir à ces *Deadlock* un trajet allant de l'Ecosphère à la Biosphère profonde (processus de subduction), d'établir une relation fonctionnelle de continuité entièrement cohérente, entre les cycles propres aux organismes élémentaires des biogéocénoses de l'Ecosphère et les grands cycles de la Biosphère.

L'ensemble illustre une direction continue de l'évolution, allant du micro-système au macro-système, et met le doigt sur son résultat ultime : la production et la stabilisation de la distance à l'équilibre de la Biosphère dans sa globalité.

Ce qui autorise ainsi la cohérence d'un bilan thermodynamique agrégeant de proche en proche la distance à l'équilibre des organismes et territoires pour finalement obtenir la distance à l'équilibre de la Biosphère.

Pour peu que l'on trouve la bonne formule de mesure !

Mais la théorie des écosystèmes n'avait cependant pas eu besoin de nos remarques pour rencontrer, tout au bout d'un long travail de recherche fondamentale et appliquée, des problèmes dont Jørgensen et ses partenaires se trouvèrent bientôt en situation de devoir rendre compte.

## 2.4 Exergie et biodiversité : Une problématique *vitale*

Nous abordons ici la seconde composante, vitale, de notre problématique globale, la mesure de l'énergie biogéochimique du vivant et de la diversité biologique. Elle comporte deux aspects en interrelation.

- L'indice  $H'$  de Shannon et la mesure de la diversité,
- Les facteurs  $\beta$  de Jørgensen et la mesure de la diversité biologique.

Le traitement de ces deux aspects nous mènera progressivement, de la fin de cette section à la fin du chapitre II, vers une grande synthèse résumant toutes les dimensions de cette seconde composante de notre problématique globale.

### 2.4.1 Premier aspect : L'indice $H'$ de Shannon et la mesure de la diversité

L'exergie était devenue un référentiel pour la CBD (2010), et promettait de traduire, avec les facteurs  $\beta$  et l'éco-exergie, le côté « information-structure » de la direction de l'évolution dans une énergie biogéochimique spécifique à la biodiversité, dont l'Empreinte écologique n'avait su rendre compte (CBD, 2005)<sup>147</sup>.

Afin de caractériser et mettre au point ces facteurs  $\beta$ , propres à chaque espèce, et ce faisant d'interpréter la diversité biologique dans une mesure biophysique, Jørgensen et ses partenaires avaient étudié pendant plus de vingt ans les variations de composition en espèces de l'écosystème marin de l'Estuaire de Mondego, à l'ouest du Portugal, au long des variations de pollutions auxquelles il fut confronté.

Les résultats de ces études furent pour beaucoup dans la mise au point de la formule de l'éco-exergie des espèces marines et la formulation des dix lois fondamentales des écosystèmes.

Fonseca et autres (2002), Jørgensen et autres (2007), Silow & Mokry (2009) nous les fournissent dans leurs publications, que ce soit pour les facteurs  $\beta$  ou les mesures quantitatives de biomasse de l'écosystème. Comme il est écrit dans *A new Ecology* :

L'Estuaire de Mondego a été utilisé pour bénéficier de l'intégration d'information dérivée de différents indicateurs écologiques : éco-exergie, éco-exergie spécifique (chapitres 2 et 7), et ascendance<sup>148</sup> (chapitre 4) [Jørgensen et autres, 2007].

Mais à ce stade, nous ne nous intéresserons qu'au constat réalisé par Jørgensen dans *A new Ecology*, quand avec ses partenaires il utilisa l'indice de Shannon pour « vérifier » la biodiversité des écosystèmes mesurés en éco-exergie (le Joule étant l'unité de base).

#### 2.4.1.1 Le constat de Jørgensen

Ce constat traverse, voire « conditionne », une grande partie (pp. 44-50, 73-74, 155-156, 222-223, 235-237) de *A new Ecology* (Jørgensen et autres, 2007).

---

<sup>147</sup> Les techniciens spécialistes de l'Empreinte écologique (du GFN) se sont d'ailleurs mis depuis en relation avec les partenaires de Jørgensen pour semble-t-il s'inspirer de leurs solutions à cette question.

<sup>148</sup> Le concept d'*ascendance* est à peu de choses l'équivalent du concept d'*aromorphose* formulé en 1914 par Sewertzoff, et élargi entretemps aux *biogéocénoses* par Vernadsky et ses partenaires.

Cet ouvrage avait d'abord introduit l'entropie de Shannon (indice H') comme une mesure évidente de la biodiversité, éprouvée par des générations de naturalistes (Ibid.:71-73), qui mesurait notamment l'« hétérogénéité » des différentes espèces.

Ceci pour relater ensuite un problème rencontré avec cet indice, que nous résumerons en quelques phrases et citations.

Au sortir d'une longue série de mesure en éco-exergie des communautés benthiques de l'*Estuaire de Mondego*, courant sur plusieurs cycles annuels, les auteurs précisait :

La variation temporelle et spatiale de l'éco-exergie, de l'exergie spécifique, de la richesse en espèces et de l'hétérogénéité furent analysées pour examiner dans quelle mesure ces indicateurs écologiques seraient susceptibles de capturer les changements dans les communautés benthiques au long du gradient de leur eutrophication<sup>149</sup> [Ibid.:236].

Passons sur les résultats concernant la richesse en espèces et en éco-exergie (nous y reviendrons dans notre troisième chapitre), et concentrons-nous sur les résultats donnés en regard de l'hétérogénéité, vue comme mesure de biodiversité :

Au regard de la biodiversité, la variation de la richesse en espèces et de l'hétérogénéité (régularité de la richesse en espèces) au long du gradient d'eutrophication nous a fourni des images très différentes. A travers le temps, la richesse en espèces fut toujours plus haute dans la communauté *Zostera*, diminuant au long du gradient d'eutrophication. Au contraire, l'hétérogénéité fut toujours plus grande dans les zones eutrophiées, à l'exception de la diminution observée dans zone la plus fortement eutrophiée après un 'crash d'algues'<sup>150</sup>. La variation observée de l'hétérogénéité est due au fait que l'indice de Shannon-Wiener intègre deux composantes : la richesse en espèces et leur abondance relative (régularité). Par conséquent, quoique la richesse en espèces décroisse comme une fonction de l'eutrophication relative, comme nous l'attendions, la dominance de quelques espèces (...) dans la communauté *Zostera*, probablement due à l'abondance des ressources nutritionnelles, a fait diminuer la richesse en espèces, et conséquemment les valeurs d'hétérogénéité. Dans ce cas, des valeurs plus basses d'hétérogénéité doivent être interprétées comme exprimant une plus haute activité biologique, et non comme un résultat du stress environnemental [Ibid.].

Il y avait ici un vrai problème. Plus l'écosystème s'étouffait, plus la biodiversité augmentait. Et le paradoxe était tel que nos auteurs, comme le firent d'autres chercheurs que nous citerons à la suite, assimilaient l'hétérogénéité à une régularité de la richesse en espèces.

Mais poursuivons :

La richesse en espèces et l'éco-exergie furent significativement corrélées ( $p \leq 0.05$ ), suivant un modèle similaire, diminuant ensemble des zones non eutrophiées aux zones eutrophiées (Figure 9.14B) [Ndlr : cette figure est reprise plus bas sous le n°25]. Au contraire, l'hétérogénéité et l'éco-exergie sont apparues négativement corrélées, nous fournissant une image totalement différente de la communauté benthique au long du gradient d'eutrophication (Figure 9.14B). Ceci évidemment résultait des propriétés de la mesure d'hétérogénéité comme expliqué auparavant (...). L'hypothèse que l'éco-exergie et la biodiversité suivraient la même tendance dans l'espace et le temps fut validée au regard de la richesse en espèces mais pas de l'hétérogénéité. Actuellement, l'éco-exergie, l'éco-exergie spécifique et la richesse en espèces ont répondu à l'hypothèse d'une diminution depuis les

<sup>149</sup> Rappelons que l'eutrophication, ou niveau d'étouffement d'un écosystème, est un indice premier de sa dégradation, la respiration (oxydation) étant une fonction première des organismes hétérotrophes.

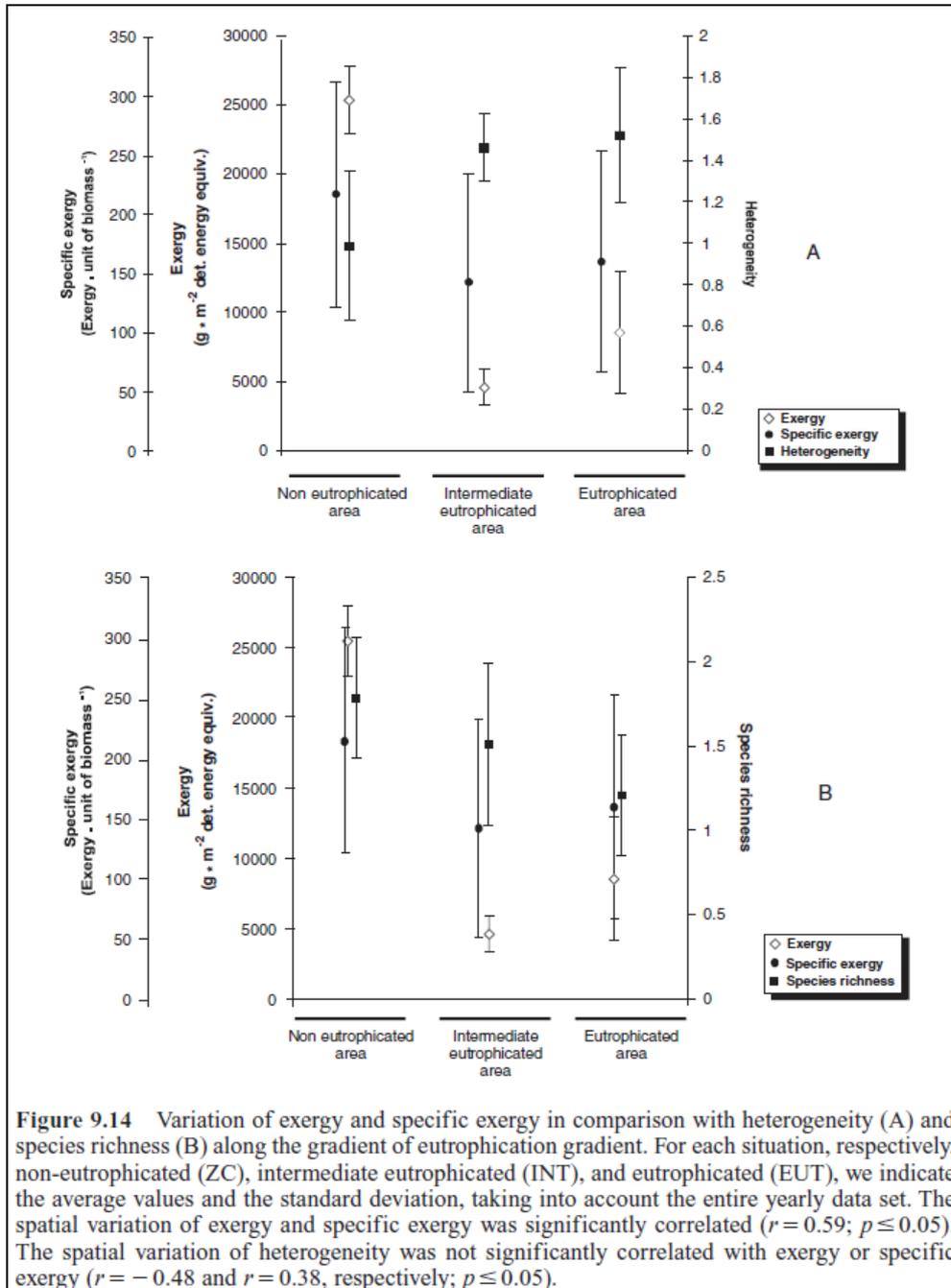
<sup>150</sup> Le crash est dans ce cas un accident écologique dû à un étouffement de la communauté d'algues *Zostera*. Les zostères sont présentes dans les mers de tous les continents du globe. On les trouve dans les sédiments sableux ou dans les estuaires, entièrement submergées ou partiellement flottantes. Leurs herbiers forment l'habitat de nombreuses espèces. Les feuilles de zostères elles-mêmes sont le support d'algues épiphytes. Elles sont un indicateur de santé des écosystèmes marins.

zones non eutrophiées jusqu'aux zones eutrophiées, mais l'hétérogénéité répond dans un sens opposé, montrant les plus basses valeurs dans les zones non eutrophiées (...) Quoique la biodiversité puisse être considérée comme une propriété importante de la structure des écosystèmes, la relative subjectivité de sa mesure constitue un problème évident. [Ibid.:237].

Nous pouvons vérifier dans le tableau suivant ce constat catégorique de Jørgensen à propos de l'indice de Shannon, même s'il n'en donnait aucune explication (Ibid.:238).

Notons que dans ce tableau l'hétérogénéité est mesurée par l'indice de Shannon, et que l'exergie spécifique correspond à l'éco-exergie de Jørgensen.

Figure 25 : Contradiction entre (éco)exergie et indice de Shannon



Source : Jørgensen et autres, 2007:238

### 2.4.1.2 Constat confirmé : L'indice $H'$ contredit la biodiversité

De plus en plus de chercheurs utilisent les indices de Shannon et de Simpson pour mesurer la diversité, sous toutes ses formes.

Nous avons vu que Jørgensen avait utilisé l'indice  $H'$  de Shannon à l'échelle d'un écosystème élémentaire.

Harini Nagendra a utilisé quant à lui l'indice  $H'$  et l'indice  $D$  de Simpson de manière comparative, à l'échelle supérieure des territoires et paysages, supposée vérifier la continuité de la biodiversité depuis les organismes élémentaires. Ce que Vernadsky et ses partenaires avaient amplement démontré.

Il a ainsi réalisé en 2000 une étude d'application des deux indices pour comparer la diversité de deux paysages indiens très similaires. Obtenant des résultats très contradictoires, il nous en a fait part dans un article dont nous reprenons ici le résumé :

Parmi les plus populaires des mesures utilisées pour quantifier la composition d'un paysage, nous trouvons l'indice de Shannon, considéré mettre l'accent sur la composante richesse de la diversité, et l'indice de Simpson, qui met l'accent sur la composante équitabilité. Ces indices peuvent montrer des variations considérables en réponse à des changements dans la richesse des paysages et l'équitabilité. Toutefois, la possibilité de rencontrer des tendances contradictoires, dans les réponses de ces indices à des assemblages qui ne diffèrent que par une seule composante de la diversité, n'a pas été suffisamment reconnue. Une réponse contradictoire de ces indices a été observée pour deux paysages indiens avec la même richesse, ne différant que par l'équitabilité. En utilisant une simulation numérique, il a été démontré que la probabilité de rencontrer des paysages avec une réponse contradictoire augmente avec la richesse, passant d'environ 4% pour les paysages constitués de trois types de couverture, à environ 6% pour dix types. Cela souligne la nécessité d'être prudent dans le choix d'un indice de diversité des paysages [Nagendra, 2000].

Nous n'entrerons pas dans l'analyse des résultats de ce chercheur, nous commenterons simplement son article. Il insiste sur deux aspects différents de la diversité : richesse et régularité (evenness), dites par ailleurs équitabilité ou équiprobabilité ; et il nous montre son étonnement devant le comportement paradoxal des deux indices, qui deviennent (ici encore) contradictoires quand la richesse augmente, ou qui augmentent ensemble quand c'est la régularité (tendance à l'équilibre) qui augmente.

Il est frappant de constater les mots de ce chercheur pour définir la diversité, alors même qu'il est « contre-intuitivement » confronté à la contradiction de ces mesures :

La richesse d'un paysage se réfère au nombre de différents types de couverture qu'il comporte ; plus grand est le nombre de types de couverture, plus divers est le paysage en termes de richesse. D'un autre côté, la régularité d'un paysage se réfère au pourcentage relatif de la distribution des couvertures au long de cette richesse. Plus équitable est cette distribution, plus divers est le paysage en termes de régularité [Ibid.].

Ce qui, rapporté à la diversité (ou encore la richesse) d'un paysage, met en valeur la contradiction de la seconde partie de cette définition. Quand la diversité se devrait, en principe, d'augmenter avec la différentielle des pourcentages de couverture, ce qui est le premier critère d'un indice de diversité de type  $\beta$ , nous voyons notre auteur, incrédule, s'imposer à lui même ce merveilleux oxymore pour justifier cette diversité au regard de l'équitabilité constatée ; que nous résumerons ainsi :

Plus grande est l'équitabilité ou l'équiprobabilité de la distribution des types de couverture, plus grande est la diversité d'un paysage en termes de régularité !

Jørgensen avait, forcé par les choses, utilisé un oxymore de même nature quand il avait assimilé l'hétérogénéité de Shannon à une régularité de la richesse en espèces.

En se référant ainsi à un « canon » probablement imposé par l'usage de son milieu professionnel, notre auteur en viendra à définir la diversité globale comme l'union de la richesse ( $\alpha$ ) et de la régularité (evenness).

Ceci quand bien même nous avons vu que la diversité globale  $\gamma$ , se devait d'être le résultat de la conjugaison de la diversité  $\alpha$  (la richesse) et de la diversité  $\beta$  vue comme un niveau de « différenciation ».

### 2.4.1.3 La théorie des écosystèmes remise en cause

Revenons maintenant au constat de Jørgensen.

Au terme de plus de vingt années de travail de toute une équipe de chercheurs hautement qualifiés sur la formulation et la mesure in situ de l'éco-exergie des organismes vivants et de leurs écosystèmes, la contradiction de la mesure d'hétérogénéité de Shannon, restée pour Jørgensen inexpliquée, fut un grand choc.

Elle remettait en question certaines hypothèses centrales de la théorie des écosystèmes, qui devenaient en contrecoup non seulement contradictoires aux mesures traditionnelles de la diversité, mais aussi et surtout contradictoires à une théorie de l'information dominant toute la modernité et partout utilisée en biologie.

Depuis Prigogine, il avait pourtant semblé que les principes nouveaux des structures dissipatives, qui avaient reçu l'approbation de la communauté scientifique mondiale, permettraient enfin cette unification des théories autonomes de la physique et de la biologie à laquelle avait aspiré Schrödinger [Bailly et Longo, 2008].

Et comme une suite logique à ces principes, Jørgensen et ses partenaires avaient particulièrement tenu à s'adosser aux conclusions de Prigogine sur la production d'entropie du vivant<sup>151</sup> pour introduire leurs dix lois fondamentales des écosystèmes.

C'était ainsi tout le processus de construction d'une *théorie des écosystèmes* en quête de reconnaissance qui était remis en cause, se fissurait, puis perdait une patte qui le rendait bancal.

Une remise en cause qui la rendait fragile au regard d'une *directionnalité des écosystèmes* qu'avait soulignée avec tant de bruit Lotka, et dont voulait tout entier rendre compte *A new Ecology* (Jørgensen et autres, 2007, chapitre 4 : *Ecosystems have Directionality*).

Cela faisait beaucoup. Il s'en suivra dans leur ouvrage tout un ensemble de paragraphes dans lesquels les auteurs, en mal d'élucidation du *paradoxe de Shannon*, reviendront sur les différences entre physique et biologie, puis tenteront de définir une nouvelle forme « d'ouverture » des systèmes, supposée justifier ce mystère : l'ouverture « ontique ».

Ceci quand, exactement à l'inverse, Gubanov et Degermendzhy (2008) avaient développé, à la même époque, une théorie de « clôture » des biogéocénoses !<sup>152</sup>

<sup>151</sup> Ce qui sera aussi le cas d'un autre spécialiste de la thermodynamique du vivant, plus précisément des *processus biologiques* (Zotin, 1978), dont nous étudierons brièvement les travaux.

<sup>152</sup> Notons à cet endroit une dérive sémantique des concepts systémiques qui pourrait être troublante. Prigogine (1968) avait définis trois types de systèmes : les systèmes *isolés*, qui ne peuvent échanger ni énergie ni matière, les

Cette théorie d'ouverture des écosystèmes se réfère à l'ontologie, souvent décrite comme une partie de la métaphysique, et à partir de laquelle Walther Elsasser, un physicien allemand, aurait défini quatre principes établissant les différences entre la physique et la biologie : A - L'hétérogénéité ordonnée (nous retrouvons notre problème), B - La sélection créative, C - la mémoire holistique, D - Le symbolisme opératif (Jørgensen et autres, 2007:44).

Nous n'entrerons pas dans de tels débats, et ne les citons que pour mémoire de l'ampleur comme de la complexité de la problématique qu'avait soulevée l'indice de Shannon.

Ce en quoi l'échec auquel il avait mené Jørgensen et ses partenaires fondait une problématique tout à fait 'vitale' concernant la mesure de l'énergie biogéochimique.

Il s'agit donc pour nous de creuser en profondeur ce problème, de telle manière à identifier ses causes réelles, puis de trouver des pistes de solution.

Nous aborderons ensuite le second aspect de la problématique 'vitale' qu'avait soulignée la CBD, concernant les facteurs  $\beta$  comme indice informationnel de biodiversité à l'échelle des écosystèmes, des territoires et paysages.

#### 2.4.1.4 L'entropie de Shannon face aux systèmes vivants

Pour la société de l'information dans laquelle nous sommes entrés depuis plusieurs décennies, l'entropie de Shannon (29) a constitué un pivot autour duquel furent testés, partout, les algorithmes visant à mesurer le statut et la signifiante de l'information (réseaux téléphoniques, informatiques, bancaires, des services secrets, ...), et dans leur prolongement, le pivot autour duquel furent construites les mesures classiques de la diversité, supposées mesurer le « niveau d'information » d'un écosystème, ... d'un organisme, ... du code génétique....

De la même manière, l'entropie de Simpson (30), dont les concepts suivent de près celle de Shannon, et que l'on retrouve dans l'« index Blau » de diversité, ou « index de Gibbs-Martin », sert dans les études de sociologie, de psychologie et de management.

Le concept d'entropie de l'information apparaît donc essentiel. Cette question est apparue si cruciale qu'un chercheur suisse, François Bonsack, a consacré la totalité de son doctorat à la clarifier, résumant sa thèse dans un ouvrage : *Information, thermodynamique, vie et pensée* (Bonsack, 1961), considéré alors comme « la » référence à ce sujet.

Question qui a été reprise et traitée en profondeur dans le cours magistral d'un éminent professeur du Conservatoire National des Arts et Métiers (CNAM), Bruno Lussato, ancien titulaire de la chaire de *Théories et systèmes d'organisation* du CNAM, grand spécialiste de la théorie de l'information<sup>153</sup>, qui se référait lui même à Bonsack pour formuler ce problème et proposer des solutions (Lussato, 1987).

---

systèmes *fermés*, qui échangent de l'énergie mais sans matière, et les systèmes *ouverts*, qui échangent à la fois énergie et matière avec l'extérieur. Ceci quand Jørgensen utilise « semble-t-il » (nous ne sommes pas certains de la référence, non signée) une terminologie différente : respectivement les systèmes *clos*, les systèmes *isolés*, et les systèmes *ouverts*. Ce qui introduit une confusion sur les systèmes *isolés* et *clos*, ces derniers, qui n'échangeraient ni énergie ni matière, ne devant surtout pas être confondus avec les systèmes *clos* de Gubanov et Degermendzhy, dont on reverra si besoin le concept au paragraphe 2.1.7.2.

<sup>153</sup> B. Lussato aura été, entre autres, un des concepteurs du Macintosh et du nouveau système d'information et de pilotage de l'Airbus A320.

Question finalement si importante que, selon nous, si Jørgensen s'est confronté à un tel problème, ce fut du fait même des ambiguïtés du concept d'entropie statistique retenu par la théorie de l'information au regard de l'entropie thermodynamique, et surtout de leurs regards spécifiques sur la notion d'équilibre.

Il y avait une question qui resurgissait, la mesure du vivant face au principe de Clausius !

Il s'agit donc maintenant de bien déconstruire la signification de l'indice de Shannon au regard de la diversité.

### De la notion d'équilibre

Le Chatelier (1884) a énoncé les lois générales des équilibres chimiques, qui interprètent la production d'entropie en un effet directement mesurable lors des changements d'état de n'importe quel système physique, qui tous et toujours tendent dans la même direction, l'équilibre thermodynamique.

Ces lois d'équilibre ont ainsi permis au chimiste suédois Lars Gunnar Sillén (1965), de calculer l'état d'équilibre standard donnant la juste répartition de l'oxygène, de l'azote et du gaz carbonique au sein de l'atmosphère terrestre, au delà de laquelle nous entrons dans le dérèglement climatique. Tout comme elles permettent aujourd'hui aux spécialistes de la Nasa d'étudier la composition de l'atmosphère et son évolution depuis les origines de sa formation.

Mais Prigogine (1947, 1968), a plus tard montré le principe d'existence de structures dissipatives de « non-équilibre », dont la caractéristique essentielle est de lutter contre l'équilibre thermodynamique par la production continue d'entropie.

L'équilibre, puis la distance à l'équilibre, sont ainsi devenus des indicateurs entropiques fondamentaux des sciences de l'environnement et de l'état de santé de notre planète, en même temps qu'un indicateur de santé des organismes vivants et des écosystèmes.

Mais pourtant, il est deux entropies, l'entropie thermodynamique et l'entropie de l'information ne débouchent « pas du tout » sur la même notion de l'équilibre !

Là où, dans une analyse superficielle, les deux entropies semblent en effet avoir a priori la même signification, une analyse plus approfondie nous montre que le concept d'équilibre, tel qu'il ressort de la théorie de l'information, met en exergue une contradiction « structurelle » par rapport à l'entropie thermodynamique, qui bloque tout véritable élargissement de la physique statistique et de la thermodynamique à la biologie.

### Postulat fondamental de la physique statistique

Alors que la thermodynamique d'équilibre étudiait depuis le 18<sup>e</sup> siècle les propriétés des systèmes matériels macroscopiques, tels que gaz, liquides et solides, la physique statistique d'équilibre (ou thermodynamique statistique), fut introduite à partir du milieu du 19<sup>e</sup> siècle, (avec Maxwell, Boltzmann et Gibbs) quand apparut la nécessité de fonder une explication rationnelle des lois d'évolution des systèmes macroscopiques à partir des propriétés dynamiques de leurs constituants corpusculaires microscopiques (atomes, électrons, photons, particules élémentaires, ...). La confirmation du bien-fondé de l'approche statistique de la thermodynamique ne fut acquise qu'au début du 20<sup>e</sup> siècle après les observations expérimentales prouvant l'existence des atomes et des électrons.

Le postulat fondamental de la physique statistique, déduit notamment de l'entropie de Boltzmann, nous dit :

Étant donné un système isolé en équilibre, il se trouve avec probabilités égales dans chacun de ses micro-états accessibles [Wikipédia : Physique statistique].

Ce dont on tire deux grands axiomes :

- Un système isolé atteint l'équilibre lorsque son entropie devient maximale (équiprobabilité).
- En associant aux  $n$  micro-états énergétiques d'un système la probabilité  $p_i$ , la probabilité à l'équilibre de chaque micro-état sera «  $p_i = 1/n$  ».

Ce postulat fondamental permet de conclure que :

Pour un système à l'équilibre, l'état thermodynamique (le macro-état) qui peut résulter du plus grand nombre de micro-états énergétiques est aussi le macro-état le plus probable du système [Ibid.].

### Temps 1 : L'entropie de Shannon vérifie l'entropie de Boltzmann

C'est à partir de ce postulat que Shannon put rapprocher les grands principes de sa mesure entropique de l'information (formule 29), de la formule d'entropie de Boltzmann. Citons Shannon lui-même :

Les quantités de la forme  $H = -\sum p_i \log p_i$  (...) joue un rôle central dans la théorie de l'information comme mesure de l'information, du choix et de l'incertitude<sup>154</sup>. La forme de  $H$  sera reconnue comme celle de l'entropie telle qu'elle est définie dans certaines formulations de la mécanique statistique où  $p_i$  est la probabilité d'un système d'être dans chaque cellule  $i$  de ses espaces de phase.  $H$  est ainsi, par exemple, le  $H$  dans le fameux théorème  $H$  de Boltzmann [Shannon, 1948:11].

Nous avons vu que le théorème  $H$  est un théorème démontré par Boltzmann en 1872 selon lequel il existe une certaine grandeur  $H$  qui varie de façon monotone au cours du temps lorsqu'un gaz tend vers l'état d'équilibre.  $H$  sera finalement rapproché de l'entropie  $S$ , dont Boltzmann avait énoncé la formule « statistique » (formule 18), qui est aussi parfois représentée, comme chez Eriksson & Wall (1976), sous la forme :

$$S = -K_B \sum_{i=\Omega}^n p_i \log p_i \quad (31)$$

Le  $H$  de Shannon était donc une référence directe au  $H$  de Boltzmann, et en effet, les deux axiomes tirés du postulat fondamental de la physique statistique nous expliquent au regard de la formule de Shannon (29), cette relation directe qu'il croyait pouvoir établir.

L'entropie de Shannon était donc à ce stade d'une même dimension que l'entropie statistique de Boltzmann. Ce que l'on vérifie en comparant les formules (29) et (31) qui, en ignorant la constante de Boltzmann (comme le fait lui-même Shannon dans sa citation), sont a priori identiques ; elles varient dans le même sens et les mêmes proportions, et semblent caractériser une même fonction.

### Temps 2 : L'entropie de Shannon contrarie l'entropie de Boltzmann

Mais reprenons maintenant la conclusion du postulat fondamental.

---

<sup>154</sup> Souvenons-nous de ce que disait Lotka à ce propos.

Pour un système à l'équilibre, l'état thermodynamique (le macro-état) qui peut résulter du plus grand nombre de micro-états énergétiques est aussi le macro-état le plus probable du système [Ibid.].

Pour la physique statistique, le macro-état d'un système à l'équilibre (l'équiprobabilité des micro-états) est donc l'état le plus probable du système, donc le plus certain et commun.

Cette conclusion, qui rend directement compte du principe de Clausius, constitue *le point d'articulation* entre la physique statistique et la thermodynamique classique.

Mais voyons maintenant ce qu'il en est de la théorie de l'information. Si nous reprenons la figure 18 (Illustration de l'entropie statistique  $H'$ , selon Shannon)<sup>155</sup>, et les explications qui la précèdent et la suivent, l'état d'équilibre ou équiprobabilité ( $1/n$ ), est au contraire le plus improbable et incertain, le plus rare.

La contradiction devient évidente !

Quand nous avons vu, tout au long de la deuxième section de ce chapitre « l'extrême importance » de cette question du « sens » (de la direction) de l'évolution, Shannon fondait ici une différence de « sens » (dans tous les sens du terme) entre l'entropie de l'information et l'entropie statistique qui semble lui avoir complètement échappée.

Ainsi qu'à John Von Neuman d'ailleurs, quand, selon ce que Shannon a rapporté, il lui aurait suggéré, avec la plus grande et distinguée décontraction<sup>156</sup>, de nommer sa nouvelle formule « entropie » ; dans le contexte suivant :

Quoique l'histoire varie, il ne semble pas initialement que Shannon ait été particulièrement conscient de la proche similarité entre sa nouvelle quantité et les travaux précédents en thermodynamique. Tandis qu'il travaillait à ses équations depuis un moment, il rendit visite au mathématicien John von Neumann. Durant leur entretien, voyant comment Shannon pourrait nommer la « mesure de l'incertitude » ou l'atténuation des signaux dans une ligne téléphonique, en relation avec sa nouvelle théorie de l'information, Shannon a raconté que Von Neumann alors suggéra : « La théorie est excellente, mais elle a besoin d'un bon nom pour "information perdue". Pourquoi ne l'appelles-tu pas entropie ? Premièrement, un développement mathématique ressemblant fort au tien existe déjà dans la mécanique statistique de Boltzmann, et deuxièmement, personne ne comprend vraiment bien l'entropie, donc dans toute discussion, tu te trouveras dans une position avantageuse » [ESPCI, 2000 ; Wikipédia, 2014, *History of Entropy*].

Ainsi Von Neuman avait tout à fait raison, personne ne comprend vraiment bien l'entropie !

Mais ce n'est pas tout.

---

<sup>155</sup> Nous ne sommes pas mathématicien, tout comme nombre de nos lecteurs, mais nous savons développer les calculs afférents aux formules mathématiques. Il nous a semblé dès lors plus « opérationnel », en terme de démonstration, de développer une figure de synthèse résultant de très nombreux calculs d'application de la formule de Shannon, et à priori compréhensible par tout un chacun, plutôt que de développer une formule mathématique qui, de toute façon, « ne révélerait pas » (comme Jørgensen (2007) et Nagendra (2000) l'ont vérifié) les défauts d'une mauvaise application que nous avons voulu mettre en relief.

<sup>156</sup> Nous pourrions ajouter cette image d'Epinal : ...en tirant sur sa pipe, alors qu'il était confortablement assis dans son fauteuil de cuir, devant la cheminée.

### De l'inerte au vivant : un rapport à l'équilibre de sens contraire

Quoique d'une rareté de sens contraire, l'entropie de Boltzmann et de Shannon vont cependant dans le même sens d'un maximum entropique matérialisé par l'équilibre.

Mais il s'agit ici de la tendance vers l'équilibre qui caractérise les systèmes *fermés*, qui n'échangent que de l'énergie avec l'extérieur.

Avec les systèmes *ouverts* (qui échangent énergie et matière), dont notamment les structures dissipatives et les systèmes biologiques, Prigogine nous a appris depuis qu'en produisant en continu de l'entropie, ils ne se rapprochent pas de l'équilibre, mais se maintiennent dans un certain état en rejetant l'entropie dans le monde extérieur, dans leur environnement. Et c'est ce dernier qui tend vers l'équilibre, non ces structures elles-mêmes (quoiqu'en vieillissant elles incorporent une partie de cette entropie).

Quant à ces structures, c'est en rejetant cette entropie « positive » à l'extérieur qu'elles se maintiennent en continu *loin de l'équilibre*, grâce à la production et au stockage interne d'entropie « négative » (énergie libre), de sens contraire à la première.

Et elles le font, pour les hétérotrophes, en absorbant l'entropie négative du monde extérieur « contenue » dans l'énergie géochimique, soit dans l'exergie, que nous avons assimilée dans une première approximation à la conjugaison  $pV$ .

Ceci non pas en l'oxydant entièrement, comme dans un moteur, mais en la « séparant » de l'entropie positive produite lors de la digestion, pour stocker le solde en interne.

Ce qui nous ramène au principe d'accumulation énergétique, qui inclut autotrophes et hétérotrophes, et confirme le paradoxe entropique de la directionnalité des écosystèmes, qui souligne que les systèmes inertes et les systèmes vivants, quoique produisant chacun de l'entropie, vont dans un sens de l'équilibre strictement contraire.

Les systèmes vivants deviennent ainsi des structures de « non-équilibre », qui tendent à produire une distance de plus en plus grande entre leur stabilité interne et l'équilibre du monde extérieur, au prorata de leur stockage interne d'énergie libre.

L'entropie de Shannon, qui mesure le « rapprochement de l'équilibre » (figure 18), serait-il très rare, ne saurait donc en aucune manière mesurer « la distance à l'équilibre » des organismes vivants, et donc mesurer le vivant, qui produit d'autant de diversité qu'il produit d'entropie négative, et inversement, au sein des cycles biotiques.

L'entropie de Shannon ne mesure donc pas le vivant, mais ses effets « entropiques » sur le monde extérieur. Ce qui n'a rien à voir avec la diversité, et d'autant moins avec la « bio »diversité !

Ce qui devient vraiment « très gênant » pour la théorie des écosystèmes, dont l'objet est de croiser les données énergétiques de l'économie physique, avec les données biologiques des écosystèmes !

Et à fortiori pour notre problématique confrontée à la nécessité de traduire la biodiversité en données biophysiques.

### Quand le « non sens » de Shannon mesure la rareté !

Ce qui nous ramène aux mots de Hoffmann et Hoffmann déjà cités :

La diversité, en essence, a toujours été définie par les indices utilisés pour la mesurer (...) La question fondamentale qui émerge n'est pas de savoir si ... est une diversité ou non - on ne peut de

toute façon y répondre - mais si cette expression mathématique fait sens ou non dans un contexte donné [Hoffmann et Hoffmann, 2007].

De toute évidence, l'expression de Shannon ne fait pas sens avec la biodiversité, si tant est que l'on veuille bien considérer que celle-ci exprime une fonction du vivant !

Et ceci même si, pour son époque, avant les travaux de Prigogine, la solution de Shannon, qui différenciait strictement la rareté de l'information de la rareté d'un système inerte, était « la meilleure qui soit ».

D'une manière étonnement subtile, c'était avec sa formule l'évidence sociologique d'un sens du langage partagé qui s'éloignait de l'équilibre thermodynamique, l'incohérence des mots (la folie) étant au contraire supposée s'en rapprocher !

Mieux encore, il nous est permis de penser que ce choix de Shannon d'une « valeur 0 pour le langage parfait » avait vocation à faire écho au « troisième principe de la thermodynamique », que nous n'avons pas vraiment abordé, et qui nous dit que *Au zéro absolu, pour un cristal parfait, l'entropie est nulle*.

Shannon rapprochait ainsi le langage parfait d'une très basse entropie, à l'image d'un diamant, ce qui est en soi tout à fait cohérent.

Même si, comme nous le verrons, basse entropie, serait-elle proche de 0, ne signifie guère néguentropie !

Mais pourtant, effet pervers d'une trop bonne intention, cette formule nous disait dans le même temps, avec sa rareté nulle du langage parfait, que la probabilité du résultat était certaine (figure 18), ce qui faisait du coup des sommets du langage humain l'expression de « la plus extrême banalité », ceci quand, ultime expression du vivant, c'est la plus grande rareté de l'Univers connu.

Avec cette formule, malheureusement malheureuse, les plus hauts sommets du langage représentaient une perfection définitive entièrement actée, certes, mais « bornée » (la valeur 0) ; il n'y avait de ce fait absolument et définitivement plus aucun intérêt à connaître ce langage, et plus aucun « nouveau sens » (dans tous les sens du terme) à explorer.

Ceci alors que le « non sens », ou encore la folie, avec une valeur ( $\log n$ ) tendant vers l'infini, devenait le nouvel inconnu, la nouvelle rareté, la nouvelle direction de l'Univers à explorer par l'humanité, ou plus exactement par la nouvelle société de l'information !

Ce qui pourrait se vérifier, et ce qui a fait dans tous les cas l'objet d'un pamphlet commun de Bruno Lussato, grand spécialiste de l'information déjà cité, et de Gérard Messadié : Bouillon de culture (Lussato et Messadié, 1986).

La fracture avec l'ensemble de la logique traditionnelle de la thermodynamique, jusqu'alors cohérente, de l'inerte au vivant, était dès lors consommée.

Mais sans que personne ne s'en aperçoive, vérifiant ainsi les mots de Von Neumann !

### **De la rareté à la biodiversité : Un glissement sémantique aux répercussions fondamentales**

Passant par la théorie de l'information, les mesures entropiques de la rareté à l'équilibre ont ainsi engendré un glissement sémantique au bout duquel on a cru devoir ou pouvoir lui assimiler la *diversité*, sans s'apercevoir qu'entretemps la thermodynamique avait considérablement évolué dans ce concept d'équilibre vis à vis des systèmes ouverts.

Shannon partait du langage courant, vu comme l'évidence « 0 » d'un « sens commun partagé », pour ensuite différencier les strates d'information, de plus en plus rares, s'éloignant progressivement du sens commun. Jusqu'aux « infinies » dimensions du non sens total, à la fois le plus équiprobable et le plus rare.

De la même manière, le naturaliste dans sa course légitime à la découverte et au recensement d'une nouvelle espèce, partait d'un milieu très riche et varié, dans lequel son espèce, celle qu'il identifierait, était forcément rare, quand des milliers d'autres, communes à forces de grouiller et de différer entre elles, formaient la même base commune d'une évidence partagée.

Nous pouvons les comprendre ; pour l'un comme pour l'autre la biodiversité était alors d'une telle évidence que seule la rareté comptait, et mesurait !

Ainsi l'équilibre et avec lui pourrait-on dire la « contre diversité », devenaient-ils « extrêmement rare », quand, au titre du second principe, l'univers, de plus en plus entropique, en tension continue vers l'équilibre, fait au contraire de l'équilibre la chose la plus universelle qui soit.

Ce qui nous a menés, depuis la fin de la seconde guerre mondiale, et malgré Schrödinger, à une inversion complète de la signification de l'équilibre, de la rareté, et avec elles de la diversité, au regard de la nature « biologique » et de sa production.

Ceci quand, au sens de l'univers physique, de la Biosphère, des théories probabilistes d'apparition du vivant, il nous semble bien que c'est la « distance à l'équilibre » qui est extrêmement rare !

Nombre de physiciens, comme Léon Brillouin (1956) et Ludwig Von Bertalanffy (1968, pp 39-40), de biologistes comme Rupert Sheldrake (1981, pp 69-70), d'experts de l'information comme Bruno Lussato (1987), d'économistes de l'écologie comme René Passet (1979, pp 172-178), ont soit cherché à expliquer la similitude ambiguë des formules de Boltzmann et Shannon, soit se sont heurtés aux conséquences paradoxales de leur mise en pratique parallèle.

Tout comme Jørgensen et Nagendra (2000).

L'indice de Shannon s'avère au final tout aussi bien contradictoire avec le caractère probabiliste de l'équilibre thermodynamique, qu'incapable de mesurer le vivant.

Il incarne quasi à lui seul toute la fracture entre la biologie et la physique !

Nous comprenons mieux dans un tel contexte que la biologie et la physique, dans un jeu de croisement paradoxal de leurs concepts de mesure, n'aient pu trouver le chemin de leur unification, ou dit autrement, n'aient pu converger sur une telle divergence.

Il est certes tout à fait compréhensible que Shannon n'ait pas intégré en son temps les apports fondamentaux d'une thermodynamique de non équilibre, qui au moment où il publiait commençait à peine à émerger.

Mais cela nous confronte pour autant à un problème de premier plan au regard de la mesure de la biodiversité, au sens de la théorie générale des biogéocénoses selon Vernadsky et ses collègues, et des écosystèmes selon Jørgensen et ses partenaires.

#### **2.4.1.5 Néguentropie de l'information : La solution primitive de Bonsack**

François Bonsack (1961) avait quant à lui cherché à faire toute la vérité sur l'ambiguïté de la formule de Shannon, au sens d'une information théoriquement « signifiante ».

En déconstruisant patiemment la formule, il avait ainsi identifié l'origine de son paradoxe, et nous avait mis sur la piste d'une analyse approfondie qui expliqua le problème de Jørgensen et s'avéra conforme à son constat.

Il avait constaté que, tout comme le principe de Carnot, qui dit qu'une transformation ne peut augmenter l'énergie libre (néguentropie), et que quand elle la dissipe, c'est irréversible, le théorème de Shannon disait de la même manière que la transcription d'un message ne peut augmenter la quantité d'information qu'il contient, et que celle-ci, quand elle se dissipe, est irrémédiablement perdue (Bonsack, 1961:77).

Sauf la probabilité de l'équilibre, l'indice de Shannon traduisait donc effectivement l'entropie de l'information, mais absolument pas sa « valeur » caractéristique, sa spécificité (Ibid. :40-41).

Elle ne pouvait dès lors traduire et mesurer cette *directionnalité* selon laquelle la sélection naturelle a toujours intensifié l'information du vivant au long des strates de constitution de la biodiversité.

Vérifier une biodiversité des écosystèmes par l'indice de Shannon ne pouvait donc mener qu'à des résultats paradoxaux.

Mais Bonsack n'en était pas resté là et avait développé, partant de ce constat, la notion d'une « entropie-spécificité », signifiante de la notion informationnelle de « choix ».

D'où le concept de « spécificité du choix », fondé sur le principe que cette spécificité était d'autant plus grande : (a) que l'entropie était plus grande avant un choix, et (b) qu'elle était plus petite après ce choix.

Spécificité du choix qui peut être aussi interprétée comme une « qualité » du choix.

Et choix qui, lui aussi, apparaissait irréversible, l'information ne pouvant dès lors que croître avec l'apprentissage.

La spécificité du choix devenait la contrepartie informationnelle de l'énergie géochimique, *néguentropique*, et traduisait en première approche cette variable intensive (?<sup>157</sup>) de complexité que Jørgensen avait mise au point... de signe et direction contraires à l'entropie de Shannon.

Une *néguentropie* du choix qu'il formula simplement ainsi (Bonsack, 1961:36)<sup>158</sup> :

$$\bar{S} = -K_B L n \Omega$$

Que nous pourrions aussi représenter ainsi :

$$\bar{S} = K_B \sum_{i=\Omega}^n p_i \log p_i \quad (32)$$

Ne serait-ce que pour pouvoir la comparer tant à la formule de Boltzmann (31) qu'à celle de l'énergie libre G (25).

<sup>157</sup> Devait-elle vraiment être intensive ? L'intensivité reflétait-elle vraiment cette spécificité ? Nous verrons cela dans la grande synthèse de ce chapitre.

<sup>158</sup> Nous avons nous-mêmes ajoutée la barre sur le S, de telle manière à le différentier de l'entropie positive.

Cette formule traduisait ainsi le concept d'action de déclenchement, parfaitement assimilable à la notion de choix, sur laquelle avait tant insisté Lotka (1921, 1922a) :

Les phénomènes réels sont irréversibles ; et, en particulier, l'action de déclenchement, qui joue un rôle si important dans les processus vivants, est un processus typiquement irréversible, la libération d'énergie utile à partir d'un « faux » équilibre (...) Que le principe de sélection soit compétent à donner de l'information au delà du champ d'application des lois de la thermodynamique a été très clairement exposé par H. Guillemot. Le présent auteur a depuis longtemps intégré le fait que ce principe est capable d'une telle application ; et qu'il fonctionne comme s'il était une troisième loi de la thermodynamique (ou une quatrième, si la troisième place doit être donnée au principe de Nernst) [Lotka, 1922b, p. 2-3/4].

La formule de Bonsack, qui traduisait ce principe de sélection dans une forme initiale, apparaissait ainsi susceptible jouer le rôle de composante « informationnelle » de ce quatrième principe qui, avec la composante « énergétique » des principes biogéochimiques, expliquerait comment le solde différentiel entre stockage d'énergie libre et dissipation avait pu devenir positif dans l'histoire de notre planète.

Ce qui serait, globalement, cohérent avec les propositions initiales de Lotka :

Voyant l'évolution comme un changement de distribution de la matière parmi les composants d'un système physique, l'étude de l'évolution se divise elle-même en deux champs. Le premier, qui doit être nommé la stœchiométrie de l'évolution, fait appel aux relations de masse : les quantités relatives de différentes espèces de matière présentes, et le changement de ces quantités, la cinétique de l'évolution. Le second champ d'étude est la dynamique ou l'énergétique de l'évolution, dont le champ d'étude est suffisamment indiqué par ces termes [Lotka, 1922a, p. 4/4].

Nous devons au premier chef à François Bonsack, qui s'était aussi interrogé sur une exception au principe de Carnot (Bonsack, 1961:chapitre VII), de nous avoir ainsi permis de « mettre le doigt » sur le nœud du problème.

Il offrait à la quête d'un indice de complexité de l'information traduisant la structuration néguentropique de l'exergie une solution préparatoire d'une portée tout aussi universelle que l'indice de Shannon.

Cette solution pour autant ne remettait nullement en cause les facteurs  $\beta$ , et au contraire validait à priori leur pertinence à mesurer la biodiversité, si tant était que l'on mette au point un indice de spécificité de l'information, traduisant non pas son entropie mais sa distance à l'équilibre.

Fallait-il de ce moment que nous reprenions ces facteurs à notre compte pour mesurer la biodiversité et établir l'actif du bilan écologique ?

Cette question pointait le doigt sur le deuxième aspect de la problématique posée par la solution de Jørgensen.

## 2.4.2 Deuxième aspect : Les facteurs $\beta$ et la mesure de la diversité biologique

### 2.4.2.1 Mesure impossible de la pleine gamme de diversité biologique

Il était écrit dans *A New Ecology* :

La biodiversité peut être vue comme la pleine gamme de la diversité biologique, depuis la variation génétique intra spécifique jusqu'à la richesse en espèces, la connectivité et l'arrangement spatial des écosystèmes à l'échelle entière et au niveau d'un paysage (Solbrig, 1991) [Jørgensen et autres, 2007: 236].

Or du fait même de la variable adoptée, les facteurs  $\beta$ , la théorie des écosystèmes se confrontait à une problématique d'échelle par laquelle elle échouait à rendre compte de toute cette gamme de biodiversité, telle que l'avait soulignée cette citation de la CBD (2010), qu'il s'avère utile de reprendre ici en entier :

Cependant, il y a encore des lacunes dans le modèle qui échouent à rendre un juste compte des échelles spatiales et temporelles de la biodiversité. Les héritages historiques et environnementaux de la biodiversité, telle que configurée à travers les paysages, nous fournissent la connectivité, et contribuent à des propriétés émergentes qui sont difficiles à catégoriser en utilisant les principes de la thermodynamique.

Qui plus est, l'utilisation des terres a changés et continue à changer ces fonctionnements naturels, conduisant souvent à la dégradation de la biodiversité et au dysfonctionnement de l'écosystème. Il est nécessaire d'élaborer un cadre conceptuel et un ensemble pratique des mesures de ces aspects de la biodiversité.

La théorie des écosystèmes contribue significativement à capturer la valeur de la biodiversité (Jørgensen 2007). Un concept unificateur de la durabilité combinerait les principes de la théorie des écosystèmes et de la biodiversité structurale (...) Essentiellement, cela appelle en faveur d'une Approche Ecosystème Radicale qui combinerait les principes de la théorie des écosystèmes et la thermodynamique de non-équilibre [CBD, 2010:186].

L'objectif de la CBD, comme cela avait été celui de Wackernagel (1994) seize ans auparavant, était en effet nous l'avons vu de développer « un cadre unifié pour la soutenabilité », conjuguant les attributs tant « fonctionnels » que « structuraux » de la biodiversité, de l'échelle des organismes à l'échelle de la Biosphère.

D'où ce concept de (bio)diversité « structurale », vu comme l'héritage direct d'une biodiversité travaillant les écosystèmes depuis des millénaires, comme le montraient parfaitement les *successions* de Clements. Ceci sans parler de l'intervention humaine.

Ce concept « unificateur », en même temps qu'il rendrait compte de la biodiversité des organismes, serait dans le même temps applicable aux échelles spatiales et temporelles des paysages.

Mais comment établir le lien demandé, entre les principes de mesure d'éco-exergie de Jørgensen, valables à l'échelle fonctionnelle des organismes, et une mesure d'énergie biogéochimique à l'échelle des écosystèmes et territoires ?

Jusqu'à l'échelle de l'Ecosphère et de la Biosphère ?

A partir des facteurs  $\beta$ , cela aurait supposé un recensement massif exhaustif et différencié des espèces et de leur masse spécifique, depuis l'échelle infinitésimale jusqu'à l'échelle macroscopique, qu'aucune étude ou système de mesure ne serait en capacité de fournir.

Et que l'on « structurerait » comment ?

Pourrait-on imaginer des facteurs  $\beta$  étendus à l'ensemble des espèces constituant un écosystème ?, aux fins de mesurer le différentiel de complexité ou biodiversité des écosystèmes entre eux ?

Et quid des territoires constitués d'écosystèmes, et de la Biosphère constituée de territoires ?

#### **2.4.2.2 Environnement de référence trop relatif**

De plus, le système de mesure de l'éco-exergie utilise, pour le calcul de la distance à l'équilibre des organismes, un référentiel (l'environnement de référence, qui permet de

caler la mesure), estimant la seule différence (de distance à l'équilibre) entre matière vivante et matière organique morte (Deadlock).

Ne mesurant pas la distance entre la matière vivante et le véritable équilibre thermodynamique, la matière complètement inerte (les éléments chimiques de base, non organisés en molécules), ce système de mesure ne saurait en conséquence prendre en compte l'exergie spécifique des éléments biogènes des compartiments thermodynamiques (atmosphère, hydrosphère, lithosphère) de la Biosphère, et de ses couches géochimiques profondes (nous expliquerons mieux cela ultérieurement).

### 2.4.2.3 Mesure incomplète de la distance à l'équilibre du vivant

Il y avait par ailleurs un autre problème dans la mesure de l'exergie des biogéocénoses, que nous avons déjà souligné.

Le système de mesure de l'éco-exergie ne prenait pas en compte de la fonction « redox » des organismes vivants, par laquelle autotrophes tout autant qu'hétérotrophes optimisent « ensemble » au sein des biogéocénoses, au long des BMC (cycles biotiques), les flux de production d'énergie biogéochimique, et l'accumulation des stocks d'énergie géochimique biogène.

Faisant que cette distance à l'équilibre, si importante pour la caractérisation du vivant, ne résulte pas de la seule augmentation d'entropie « ou » de néguentropie, mais qu'elle est le seul résultat combiné de leur interaction étroite.

Ce constat complétait le précédent pour une mesure de la distance à l'équilibre des territoires participant de leur biodiversité.

Pour mesurer la distance à l'équilibre « globale », on ne saurait mesurer les flux d'énergie biogéochimique du vivant sans intégrer dans un même cadre général de mesure les stocks d'énergie géochimique biogène.

Il y avait dans la mesure de l'énergie globale « pV » d'un écosystème, une relation entre réduction et oxydation, entre néguentropie et entropie donc, sans laquelle il ne saurait être question de mesurer la distance à l'équilibre totale de quelque organisme, biogéocénose ou territoire que ce soit.

La distance à l'équilibre du « vivant » ne résultait pas de la seule exergie cumulée, vue comme une énergie « libre et utile », mais du mystère d'une articulation redox extrêmement étroite des cycles biotiques, entièrement comprise dans cette fameuse *conjugaison pV* que nous avons entrevue, probablement la plus essentielle de la thermodynamique classique, qui avait été aux fondements premiers de sa formulation.

Ce dont une thermodynamique des écosystèmes se devait avant tout, elle aussi, de rendre compte. C'est pourquoi nous reviendrons dessus dans la grande synthèse de ce chapitre.

### 2.4.2.4 Des coefficients dispendieux et des problèmes d'éthique

Et puis il y avait enfin un dernier problème, qui faisait comme une chambre d'écho à tous les précédents. Comme nous pouvons en voir un exemple dans le tableau ci-dessous, les facteurs  $\beta$  ont un niveau d'intensité allant de 1 (virus) à plus de 2000 (homme).

Tableau 6 (figure 26) :  $\beta$ -values comme facteurs de conversion de l'exergie

Organism	Genome size (Mb)	Repeat (%)	$\beta$ -value
Human	2900	46	2149
House mouse	2500	38	2127
Tiger puffer fish	400	<10 (9 is applied)	499
Sea squirt	155	10	191
Malaria mosquito	280	16	322
Fruit fly	137	2	184
Nematode worm	97	<1 (0.5 is applied)	133
Human malaria Parasite	23	<1 (0.5 is applied)	31
Rodent malaria Parasite	25	<1 (0.5 is applied)	34
Social Amoeba	34	<1 (0.5 is applied)	46
Intracellular parasite	34	<1 (0.5 is applied)	46
Brewer's yeast	12	2.4	15.9
Fission yeast	13.8	0.35	18.8
Microsporidium, parasite	2.5	<0.1	3.4
Mustard weed	125	14	147
Rice	400	? (50 is applied)	275

Source : Jørgensen et autres, 2004

Il y a deux aspects à ce problème.

Tout d'abord, et nonobstant le fait qu'ils ont été critiqués (paradoxe des C-Values) et depuis corrigés (Fonseca et autres, 2000) pour leur signifiante, trop corrélée à la taille du génome (une souris représentait un contenu en information presque égal à l'homme, et le requin bien supérieur !), ces facteurs comparent l'homme aux autres espèces.

Or il ne s'agit surtout pas de rendre l'homme « comparable » aux autres espèces au prétexte d'une nouvelle mesure « intelligente » de l'information interne.

S'agirait-il d'intégrer l'énergie interne, biophysique, de l'homme, dans un bilan « exergetique » planétaire, serait-il même « écologique » ?

Nous entrons ici dans des dérives dont le XIXe siècle a montré la dangerosité et les conséquences tout au long du XXe siècle.

Il y a ici une « frontière éthique » qui ne saurait être dépassée, car alors nous irions tout droit vers un scénario de type « Soleil vert », ou mieux encore « Cloud Atlas », film beaucoup plus récent et par endroits explicite sur ce sujet.

Une dérive apocalyptique et cauchemardesque, que Vernadsky avait amorcée sans le vouloir.

Nous avons vu en effet que quand il déploya tout à la fin de sa vie le concept de *Noosphère*, il entra dans une nouvelle dimension de la Biosphère où l'homme pouvait apparaître comme la continuité directe du processus d'aromorphose de l'évolution.

Ce qui contribua probablement à le rendre fou, car ainsi, il devenait quelque part justifiable que la pollution globale, et même la bombe atomique, participent de cette évolution, tout comme son propre travail.

Le « matérialisme historique », qu'il avait d'abord combattu avant que celui-ci ne l'enferme dans sa logique mécaniste et totalitaire, atteignait ici avec Vernadsky les limites ultimes de la différence entre l'homme et les autres espèces vivantes.

La conscience serait-elle aussi le produit de l'évolution, des espèces ?

A mesurer quantitativement, en termes d'énergie, serait-elle biogéochimique ?!

Ou participait-elle d'une toute autre dimension ?! Dont il ne saurait être question de rendre compte dans un bilan écologique !

Il est évident que Vernadsky ne pouvait intégrer à lui seul les nouvelles dimensions de l'éthique mondiale qu'imposeront tous les événements dramatiques de la première moitié du XXe siècle. Mais il semble bien pourtant qu'il s'en soit attribué la responsabilité. Et c'est probablement l'ampleur insoutenable d'une telle responsabilité face aux chocs successifs des événements (révolution d'octobre, stalinisme, seconde guerre mondiale, ...) qui l'aura rendu fou, s'il est vérifié qu'il est mort fou.

D'où l'importance de prendre *toute* la mesure des travaux et de l'expérience globale de Vernadsky, dont nous avons tenu à ne rien cacher des diverses dimensions, tout aussi bien positives que négatives.

Ce qui semble t-il ne fut pas vraiment le cas des écologues anglo-saxons.

Ce premier aspect étant clarifié, les facteurs  $\beta$  jouent par ailleurs le rôle de « facteur de conversion » de l'exergie, et ils sont conjugués comme tels à l'exergie standard pour donner une exergie totale.

Ce qui a pour résultat immédiat de multiplier l'exergie standard potentielle des écosystèmes par une dimension allant de dix à plusieurs centaines de fois.

Tout comme le font les « EmJoules » (Embodied Joules, dits aussi « Sej » pour Solar Equivalent Joules) mesurant l'*émergie* d'Odum, c'est à dire les joules cachés et incorporés dans l'énergie géochimique par tout le travail de la nature durant des millions d'années.

Nous nous trouvons ici confrontés à une nouvelle forme de problème d'éthique.

S'agit-il de comparer l'infinitude du travail de la nature à la finitude du travail de l'homme ?

Il a fallu entre un et deux milliards d'années (à peu de choses près !!) d'action des forces géochimiques pour produire que ce soit un gramme, un kilo, ou 100.000 tonnes de pétrole brut.

Et une seconde, quelques minutes ou quelques jours selon pour les réduire définitivement à néant.

Ces deux dimensions sont-elles « commensurables » ?

Chaque jour de l'humanité qui passe consomme, en comptant très large, dans les 10.000.000 de journées « moyennes » de travail de la Nature. Et consommerions-nous cent fois moins, que chaque jour nous consommerions encore 100.000 de ses journées de travail !

Il est bien certain qu'il n'est aucune mesure conservatoire de développement durable qui jamais pourra compenser un tel différentiel.

Ainsi, la destruction totale de notre planète par l'homme semble effectivement vérifier l'assertion de Clausius comme quoi elle est irréversible.

Comme si toute l'économie moderne ne faisait que vérifier Clausius !

Mais en admettant, voire en imaginant que l'homme puisse, de nouveau, permettre ce processus d'accumulation énergétique que Podolinsky avait identifié, Lotka formulé et Vernadsky vérifié, alors tout peut être pourrait commencer à changer.

La question reviendrait simplement (façon de parler !) à ce que les écosystèmes humains reproduisent, comme les biogéocénoses, leurs cycles biotiques, positifs.

Ceci dans une nouvelle dynamique des relations homme-nature, qui reste entièrement à inventer.

Mais dont seul un *bilan écologique* global nous permettrait d'en établir le bilan, et ainsi d'en mesurer les résultats.

Dès lors, cela suppose que les deux dimensions de ce bilan, actif et passif, soit « commensurables », d'une manière logique et raisonnable.

Dans les logiques d'Odum ou de Jørgensen, on nous dira qu'il suffirait d'attribuer à chaque parcelle d'exergie consommée par le processus économie son coefficient  $\beta$ , ou à l'inverse de tracer chaque parcelle d'exergie naturelle, affublée de son coefficient, depuis son extraction primitive jusqu'à sa consommation finale dans un supermarché, voire son rejet définitif dans une décharge.

Et donc logiquement, de tracer tout autant cette parcelle « beta-isée » lors de la digestion et sa transformation en particule humaine, etc.

Bon courage !

Mais alors, puisque toute l'affaire ne devient que celle d'un coefficient différenciant l'exergie biogène de l'exergie biogéochimique producteur et produit de la biodiversité, pourquoi la complexifier à ce point ?

Ne suffirait-il pas d'un coefficient d'intensité, allant de 0 à 1, pour « différencier » l'énergie biogéochimique de l'énergie simplement biogène ?

#### 2.4.2.5 Synthèse et conséquences

Nous voici arrivés au bout d'un ensemble de constats concernant la situation très actuelle de la mesure du vivant et de la biodiversité, y compris dans ses relations avec l'Anthroposphère.

Ils expliquent notamment les rapprochements, que nous avons constatés, entamés depuis 2010 entre le GFN de Wackernagel et les partenaires de Jørgensen pour solutionner les deux systèmes de l'Empreinte écologique et de la Théorie des écosystèmes, en tentant de les fusionner dans un nouveau système global de calcul.

Mais pour notre part, quand nous rapportons ces constats aux enjeux de notre Bilan écologique, il apparaît que, quels que soient les progrès réalisés depuis les critiques initiales de Schilizzi (1987) concernant l'exergie, nous ne disposons aujourd'hui d'aucun système de mesure cohérent, depuis l'échelle des organismes jusqu'à l'échelle de l'Ecosphère et de la Biosphère, en passant par les territoires, nous permettant de mesurer leur énergie *biogéochimique*, et donc leur biodiversité.

Et ce faisant de nous permettre, comme l'exprimait si bien la CBD :

... de lier les attributs structuraux et fonctionnels de la biodiversité aux mesures thermodynamiques de la perturbation anthropogénique [CBD, 2010:86].

Ce qui nous mènera finalement à remettre en cause les facteurs  $\beta$ , non pas pour leur pertinence, que nous aurons les moyens de vérifier, mais pour l'ensemble des inconvénients, parfois considérables, qu'ils présentent.

Puis à étudier les conditions d'une transcription de la formule de Bonsack (32) en une unité de mesure de l'énergie biogéochimique reflétant la biodiversité.

Mais non sans avoir auparavant établi une synthèse du présent chapitre, qui serait utile à cadrer la résolution des problèmes que nous avons relatés.

## 2.5 Grande synthèse du chapitre II

### 2.5.1 Synthèse des relations thermodynamiques économie-nature

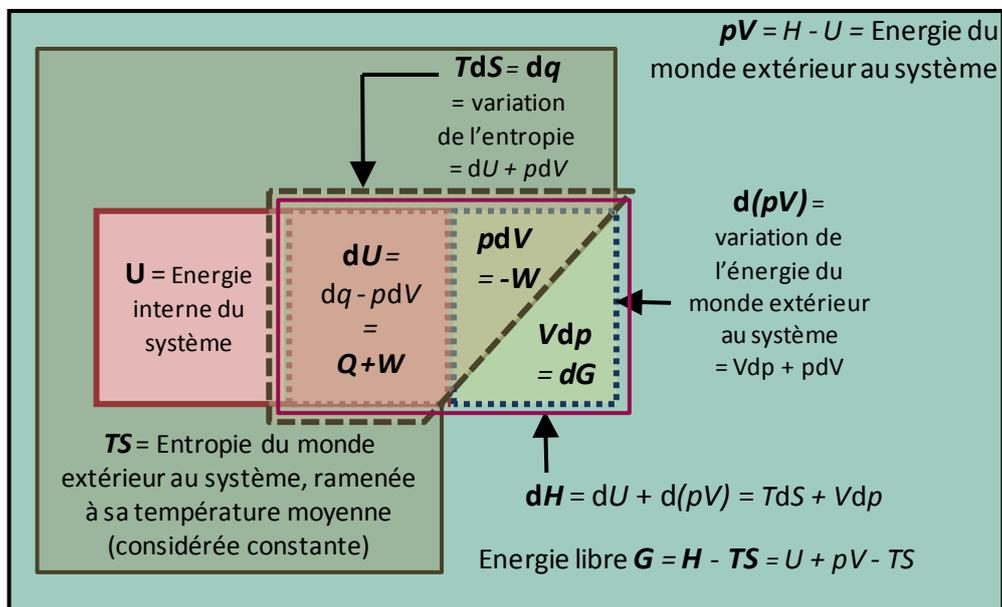
Nous avons pu établir dans la seconde section de ce chapitre différentes relations de la thermodynamique entre les variables élémentaires, leurs divisions ou conjugaisons, et les fonctions d'état.

Tentons maintenant d'en établir une synthèse partielle utile à notre propos.

Le schéma suivant nous aura personnellement offert une vue d'ensemble évitant de grosses erreurs dans l'écriture des différentes égalités entre fonctions et variables d'état.

Figure 27 : Synthèse des relations entre fonctions et variables d'état

$H =$  Enthalpie = énergie de l'ensemble =  $U + pV$



Source : Loiret, 2013a

Ce schéma nous permet de vérifier ces quatre équations fondamentales :

$$H = U + pV = G + TS$$

$$dH = dU + Vdp + pdV = dU + d(pV)$$

Et surtout<sup>159</sup> :

$$pV = G + TS - U \quad (33)$$

$$d(pV) = dH - dU = dG + TdS - dU = Vdp + pdV \quad (34)$$

<sup>159</sup> Dans ce tableau et ces équations, que nous allons ensuite rapporter à la Biosphère, nous considérons une température moyenne  $T$  constante. Il en résulte que quand la variation d'entropie  $d(TS)$  est normalement égale à  $SdT + TdS$ , nous ne retiendrons que  $d(TS) = TdS$ .

Tentons maintenant d'appliquer ces équations aux relations entre économie et nature, en prenant pour modèle le cadre opérationnel du bilan écologique (figure 3). Dans ce nouveau schéma, où les fonctions deviendront des « stocks » et les variables des « flux » :

$H$  sera l'énergie totale (énergie libre + entropie) de la Biosphère, y compris Ecosphère et Anthroposphère.

$U$  sera l'énergie totale de l'Anthroposphère (le système).

$pV$  sera l'énergie totale de la Biosphère (et de l'Ecosphère), hors Anthroposphère ( $U$ ) et conséquemment sa « distance à l'équilibre » (le milieu extérieur).

$G$  sera l'énergie libre totale de la Biosphère, Ecosphère et Anthroposphère compris.

$TS$  sera l'entropie totale de la Biosphère, Ecosphère et Anthroposphère compris, ramenée à leur température moyenne.

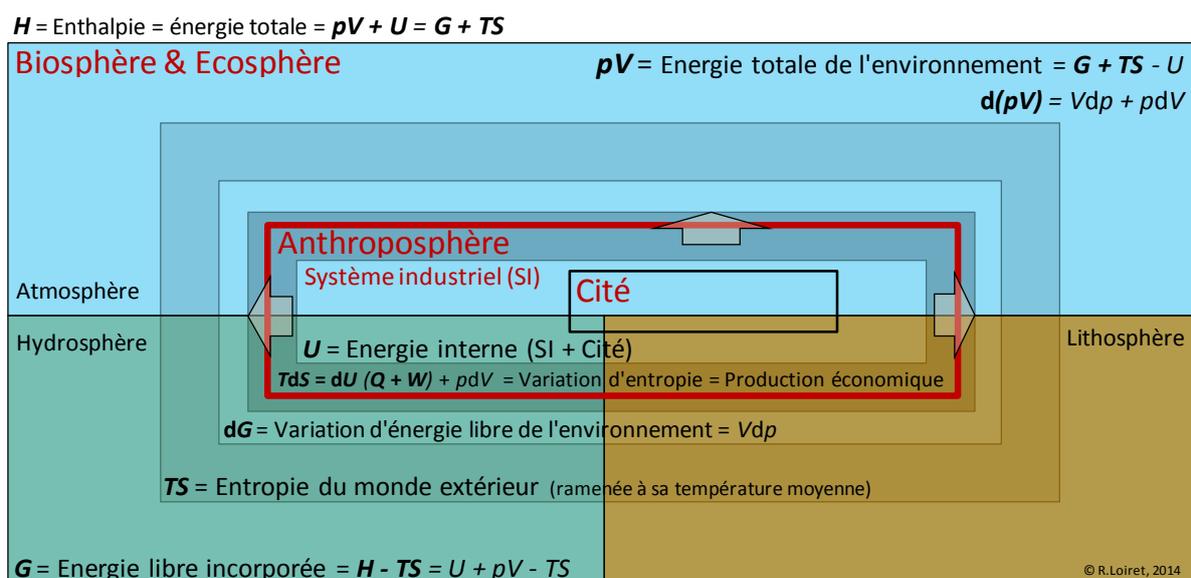
$d(pV)$  sera la variation d'énergie totale de la Biosphère (et de l'Ecosphère), et conséquemment de sa distance à l'équilibre. En termes négatifs, cette variation est due aux consommations d'énergie libre  $G$  de l'Anthroposphère et à ses rejets d'entropie  $TS$  dans l'environnement.

$Vdp$  sera soit la variation « positive » totale du stock d'énergie libre (l'accumulation énergétique) de la Biosphère et de l'Ecosphère, qui ne peut être à ce jour envisageable dans l'Anthroposphère, soit sa variation négative, due aux consommations de l'Anthroposphère.

$pdV$  sera soit la variation positive totale d'entropie (respiration des organismes vivants et oxydations/combustions de l'économie) de la Biosphère, Ecosphère et Anthroposphère compris, soit sa variation « négative » totale qui ne peut être envisageable dans l'Anthroposphère.

Ce qui nous donne un ensemble de relations économie-nature que nous représenterons ainsi :

Figure 28 : Représentation thermodynamique des relations économie-nature



Ce nouveau schéma montre que la thermodynamique serait à priori, dans ses grands principes, parfaitement applicable aux écosystèmes.

L'énergie totale  $H$  du système et de son milieu extérieur étant constante (1<sup>er</sup> principe), ce schéma nous dit avant tout qu'il ne serait pas une seule « once » d'énergie et capacité de travail de l'économie qui ne soit puisée dans la nature.

Et comme l'exergie participe de la constitution des matières biogènes, tant en énergie qu'en masse (cf. tableau 7), cette relation d'usure entropique devient tout aussi valable pour l'énergie que pour la masse matérielle des corps biogènes produits par le travail du vivant.

Tous les flux dissipés par l'économie et rejetés dans la nature, s'ils sont à priori des flux d'entropie énergétique (chaleur diffuse, ...), ont ainsi une contrepartie systématique en flux d'entropie matérielle ( $\text{CO}_2$ , déchets, pollution, ...), participant tous ensemble à la balance globale  $d(pV)$  de l'énergie totale  $pV$  spécifique à l'environnement.

Ce qui nous ouvre la possibilité d'établir une « stœchiométrie »<sup>160</sup> des territoires, intégrant tous les flux d'énergie, de matière et de pollution entrant en jeu dans les relations entre l'économie et la nature.

Avec une composition interne de  $pV$ , issu de sa variation  $d(pV)$ , qui devient de ce fait le symbole du Bilan écologique.

C'est à dire une fonction simplissime. Mais qui aurait cependant bien des propriétés que nous allons maintenant tenter de découvrir.

### 2.5.2 Synthèse fonctionnelle de $pV$ et $d(pV)$

Quand on ne regarde que l'environnement, hors Anthroposphère, la conjugaison  $pV$  apparaît comme « la » fonction thermodynamique seule susceptible de nous donner une indication de son état énergétique général.

$pV$ , mesuré en joules, est l'expression de l'énergie « totale », qui intègre tous ses états possibles, depuis l'énergie utile jusqu'à l'énergie la plus dégradée.

Que nous prenions un écosystème ou la Biosphère toute entière, son contenu énergétique total  $pV$  se conserve, même si l'état interne de cette énergie se modifie constamment.

$pV$  « incarne » ainsi le premier principe de la thermodynamique, la conservation de l'énergie, quel que soit son état.

Mais comme nous allons le voir,  $pV$ , dans l'étude de ses constituantes  $p$  et  $V$ , nous permet de rendre compte très exactement du niveau d'utilité ou de dégradation de l'énergie.

$pV$  incarne donc aussi le second principe de la thermodynamique.

Par ailleurs, la double fonction des constituants  $p$  et  $V$  de  $pV$  est un reflet direct des fonctions redox des écosystèmes.

Enfin, la formule (33) nous dit que  $pV$  résulte de 3 fonctions d'état fondamentales de la thermodynamique.

---

<sup>160</sup> C'est un calcul qui permet d'analyser les quantités de réactifs et de produits qui sont en jeu au cours d'une réaction chimique. C'est aussi la proportion des éléments dans une formule chimique.

Ce qui lui donne toutes raisons d'être une « super » fonction d'état.

Et pour toutes ces raisons, nous donnerons à la conjugaison  $pV$ , ne serait-ce que dans notre travail, le statut de « fonction d'état des écosystèmes ».

Ce qui suppose d'éclairer un tant soit peu son « fonctionnement ».

Attribuons le symbole  $G_B$  à l'énergie « libre » stockée dans les espaces naturels de la Biosphère, après avoir retiré de  $G$ , l'énergie libre totale stockée, l'énergie libre stockée dans la seule Anthroposphère ( $U$ ). Ce qui nous donne  $G - U = G_B$ .

Sachant que l'entropie (comme le  $CO_2$  en donne l'exemple) partout se dissipe et se mélange, l'énergie « totale » de la Biosphère hors Anthroposphère, puis sa variation, nous seront alors données, à partir des formules (33) et (34), par les formules :

$$pV = G_B + TS \quad (35)$$

$$d(pV) = dG_B + TdS = Vdp + pdV = 0 = Cte \quad (36)$$

Ces deux formules appellent un certain nombre d'explications.

### 2.5.2.1 $d(pV)$ , les deux principes « et » l'accumulation énergétique

L'équation (36) dérive de la loi des gaz parfaits qui donne, à  $T$  constant :  $d(pV) = pdV + Vdp = 0$ . Cette formule exprime la conservation de l'énergie, ainsi que de la masse.

Or cette loi, comme le montraient les tableaux 4 et 5, semble parfaitement s'appliquer à la matière organique (glucose, amidon, cellulose, ...), ce qui confirmerait, à l'échelle de la Biosphère, les principes de conservation de l'énergie et de la masse.

Mais nous pouvons maintenant aller plus loin.

En considérant la seule formule (35), pour autant que nous connaissions  $pV$ , nous ne voyons pas à priori comment cette conjugaison de deux grandeurs peut être égale à la somme d'une énergie libre  $G_B$  (négentropie) et d'une entropie  $TS$ .

Considérons maintenant la formule (36). Même si rien ne nous dit que  $dG_B$  peut être assimilé à  $Vdp$ , et  $TdS$  à  $pdV$ , elle nous affirme pourtant une chose, c'est que la variation cumulée de  $G_B$  et de  $TS$  est dans tous les cas « assimilable » à la variation cumulée d'une pression interne et d'un volume.

Or nous savons que  $pV$  se mesure en joules, et nous avons donné une première explication de cette conjugaison, soit une équation aux dimensions qui nous permet de déduire qu'une force de pression en pascals ( $N.m^{-2}$ ), multipliée par un volume en  $m^3$ , donne des  $Nm$ , donc des joules ( $1J = 1Nm$ ).

La seconde explication, beaucoup moins courante, est la conjugaison d'une pression « interne » mesurée en  $joules.m^{-3}$ , et d'un volume en  $m^3$ , qui donne aussi des joules<sup>161</sup>.

Cette conjugaison nous permet finalement de connaître  $Vdp + pdV$ <sup>162</sup>, avec une formule (36) qui nous exprime et nous révèle tout le mystère de la Biosphère.

C'est à dire soit une intensification énergétique par réduction et une accumulation énergétique  $dG_B$ , produits de la *direction de l'évolution*, à priori « assimilable » à une

<sup>161</sup> Cette formule est évidente, une fois révélée, mais il nous a fallu nombre de semaines pour la mettre à jour.

<sup>162</sup> Sauf cette somme d'une variation de pression et de volume que nous expliquerons plus loin.

augmentation générale de pression interne ( $Vdp > 0$ ), soit une production entropique  $TdS$  à priori « assimilable » à une augmentation de volume ( $pdV > 0$ ) par oxydation (respiration des êtres vivants, systèmes thermiques, ...). Et dans tous les cas une intrication très intime de l'un et l'autre, sachant que, à  $d(pV)$  constant, toute augmentation infime de l'un se traduira par une diminution infime de l'autre.

Mais nous allons connaître le fond de l'affaire des formules (35) et (36) en illustrant très concrètement cette fonction par le schéma suivant, qui reprend les éléments du tableau 4 en incluant cette fois les variations de pression et de volume à  $pV$  constant.

Tableau 7 (figure 29) : Stœchiométrie du glucose &  $d(pV)$ 

© R.Loiret, 2014					
Stœchiométrie du Glucose					
Formule chimique	Masses élémentaires (pour 1kg glucose)	Densité énergétique ou Pression ( $p$ )	Volume massique ( $V$ ) (inverse densité massique totale)	Exergie massique ( $pV$ )	Densité massique ( $1/V$ )
	g.kg-1	MJ.m3-1	m3.kg-1	MJ.kg-1	kg.m3-1
<b>Entrée de réduction (photosynthèse)</b>					
6 CO <sub>2</sub>	1.465,71		TS	0,662	1,270
6 H <sub>2</sub> O	599,990			1,508	2,043
<b>Energie Libre de Gibbs (G)</b>				<b>19,555</b>	
$\Sigma G + 6CO_2 + 6H_2O$	<b>2.065,70</b>	<b>71,965</b>	<b>0,30188</b>	<b>21,725</b>	<b>3,31</b>
<b>Sortie de réduction (photosynthèse)</b>					
C <sub>6</sub>	400,010			13,663	668,086
H <sub>12</sub>	67,1379			7,863	1,339
O <sub>6</sub>	532,852			0,066	2,679
$\Sigma C_6H_{12}O_6$	1.000,00	<b>14.512</b>	<b>0,00149</b>	21,592	672,104
6 O <sub>2</sub>	1.065,70			0,132	2,679
$\Sigma C_6H_{12}O_6 + 6 O_2$	<b>2.065,70</b>	<b>14.659</b>	<b>0,00148</b>	<b>21,725</b>	<b>674,783</b>
<b>Variation des densités massiques et énergétiques (total sortie/total entrée)</b>					
				<b>203,70</b>	<b>203,70</b>
<b>(1) <math>d(pV) = Vdp + pdV = 0</math></b>					
$d(pV) = (\ln(p2) - \ln(p1) = 5,316) + (\ln(V2) - \ln(V1) = - 5,316) = 0 = Cte$					
<b>(2) <math>d(pV) = dp * dV = 1</math></b>					
$d(pV) = (14.659 / 71,965 = 203,70) * (0,00148 / 0,30188 = 0,0049) = 1 = Cte$					

Source : Loiret, 2013a, 2014

Ce tableau appelle plusieurs commentaires :

- (1) Le premier, déjà formulé, est qu'il vérifie la conservation de la masse et de l'énergie (premier principe).
- (2) Le second, plus rare, est la corrélation absolue (= 1) entre variation de « densité massique » et variation de « densité énergétique » (203,70). Elle vérifie que pour la matière organique, énergie et masse ne sont qu'un aspect différent d'une même fonction d'intensification du vivant, qui illustre ainsi la *directionnalité* de l'évolution.
- (3) Le troisième concerne plus largement la constante  $d(pV) = 0$  (ou 1 selon):

- La stœchiométrie de ce tableau pouvant dans son principe être étendue à n'importe quelle transformation chimique,  $d(pV)$  se trouve en capacité de caractériser et résumer toutes les transformations chimiques fondamentales de la matière vivante.

- $d(pV)$  rend compte du principe de Carnot/Clausius « et » de sa réversibilité.
- $d(pV)$  illustre parfaitement le second principe biogéochimique de Vernadsky (sa formulation élargie), qu'il n'est pas inutile de répéter :

Lors de l'évolution des espèces, la composition chimique de la matière vivante demeure constante, mais l'énergie géochimique biogène apportée par la matière vivante dans le milieu cosmique s'accroît [Vernadsky, 1930:12].

Tous éléments confirmant qu'il n'y a ni contradiction fondamentale, ni violation du second principe, ... sauf à rendre compte de l'exception de la Biosphère !

- (4) Notre quatrième commentaire apporte quant à lui l'éclaircissement nécessaire à propos de la formule (36).  $dG_B + TdS$  étant mis de côté pour le prochain commentaire, comment dans cette formule la variation d'une *conjugaison* de deux grandeurs  $d(p \times V)$  peut-elle être égale à la *somme* de leurs variations ( $Vdp + pdV$ ) ? On ne voit pas du tout comment une variation de pression (intensive) peut être additionnée à une variation de volume (extensive).

L'explication, donnée en dessous du tableau dans les deux formes d'expression de  $d(pV)$ , est que la thermodynamique, dans ses formulations fondamentales, utilise les logarithmes népériens ( $\ln$ ), qui donnent que la somme des logarithmes népériens de deux grandeurs est égale au logarithme népérien de la conjugaison de ces deux grandeurs. Ceci permet de caractériser l'élasticité de  $d(pV)$ , que l'on peut se représenter en imaginant un ballon en caoutchouc que l'on presse entre nos mains. Plus notre pression sera grande, plus le volume diminuera, et inversement.

La différence entre les deux formulations de  $d(pV)$  dans le tableau 7 est ainsi vérifiée par le logarithme népérien de 1, qui est égal à 0.

En utilisant des nombres réels, comme cela sera généralement notre cas, nous pouvons réinterpréter la formule (36) telle qu'on la trouvera plus bas (38).

- (5) Notre cinquième commentaire concerne le mystère subsistant de la formule (36). Il n'existe finalement aucune relation directe entre  $dG_B$  et  $dp$  d'une part,  $TdS$  et  $dV$  de l'autre.  $dG_B + TdS = Cte$ , se vérifie verticalement dans la colonne  $pV$  d'exergie massique du tableau, et  $dp * dV = Cte$ , se vérifie horizontalement dans les colonnes de pression et volume.

Comme le montre ce tableau, le produit de la somme des unes converge avec le produit de la multiplication des autres, pour établir un cadrage parfait des égalités qui porte en soi tout le sens de la transformation biogéochimique.

Entre l'entrée et la sortie de réduction, nous pourrions dire que  $G_B$  et  $TS$ , originellement « distincts » ont perdu leur individualité et ont disparus dans une fusion (une sommation) produisant en sortie une nouvelle exergie  $pV$ , avec une masse et une exergie massique constants, mais avec une densité massique et énergétique entièrement différente. Ce que montre plus bas la formule (37), sachant bien que celle-ci est « réversible », comme le montrerait un tableau inverse du tableau 7.

Le mystère du vivant est ainsi clarifié sur les plans thermodynamiques et chimiques.

- (6) Notre sixième commentaire enfin, est que le vivant, comme le montraient les cycles biotiques en voie de clôture (BMC), de Gubanov et Degermendzhy (2008), utilise des fonctions « redox » (combinaison de la réduction et de l'oxydation) pour intensifier l'incorporation de l'énergie libre.

C'est à dire qu'il utilise tout aussi bien les fonctions entropiques que néguentropiques pour générer la matière vivante, ce que vérifient la formule (38) et le tableau 7.

La « respiration » du vivant (inspiration - expiration), présente chez tous les organismes vivants, n'est-elle pas la meilleure illustration des fonctions redox ?

La conjugaison  $pV$  et sa variation  $d(pV)$  illustrent ainsi, sur le plan thermodynamique, la « **fonction redox** » des écosystèmes, en termes de stock et de flux. Ce qui confirmerait leur caractère de *fonction d'état des écosystèmes*.

### 2.5.2.2 Une fonction d'état des écosystèmes ?

Nous formulerons finalement ainsi les dimensions thermodynamiques de cette *fonction d'état des écosystèmes* (à T constant), qui traduirait les transformations du vivant exposées dans le tableau 7 :

$$G_B + TS = pV \quad (37)$$

$$dG_B + TdS = d(pV) = dp * dV = Cte \quad (38)$$

Ces équations étant dans tous les cas réversibles, elles exprimeraient sous cette forme que dans la Biosphère, l'énergie libre G et l'entropie TS fusionnent dans le corps massique et énergétique de la matière vivante des organismes ; où ces fonctions jusqu'alors distinctes se combineraient pour produire une fonction d'intégration « redox » (réduction et/ou oxydation) générant les variations continues de pression et de volume, à  $pV$  constant, des organismes vivants, des écosystèmes et des biogéocénoses.

Tout comme l'énergie libre se trouvait incorporée dans l'exergie, l'entropie acquèrerait ainsi cette même propriété de corporification, et elles trouveraient ensemble une nouvelle « plasticité » (exemple du ballon en caoutchouc) les faisant travailler de concert à l'intérieur des organismes.

Plasticité qui s'exprimerait tout particulièrement dans la respiration.

Ce qui éclaire la signification de l'*endosymbiose*, de Lynn Margulis (1986), où les fonctions de réduction et d'oxydation des bactéries et archées primitives (procaryotes), jusqu'alors strictement séparées, se trouvent rassemblées dans le cytoplasme cellulaire des eucaryotes autotrophes, pour produire ensemble l'énergie biogéochimique.

Ainsi, la formule (37) illustrerait à elle seule la transformation matérielle opérée par les autotrophes lors du processus d'accumulation énergétique, quand, par leurs fonctions redox, ils fusionnent effectivement l'entropie et l'énergie libre dans une nouvelle dimension, l'exergie, à  $p$  et  $V$  variables, mais à énergie et masse constantes.

Cette équation et sa variation illustrerait la fonction primordiale de la Biosphère, l'accumulation énergétique due à la direction de l'évolution !

Comme l'a si bien montré dans sa thèse Valero Delgado (2008), la somme totale des matières vivantes et biogènes « utiles » de la Biosphère, tous éléments simples et composants chimiques confondus, se résume à un quantum général d'énergie libre  $pV$

contenue dans l'exergie matérielle, et les flux annuels d'accumulation de matière vivante peuvent se rapporter à une variation positive de  $p$  et  $V$  à l'échelle planétaire.

Mais la variation négative de  $p$  et  $V$  à  $pV$  constant, résume tout aussi bien les consommations économiques, en accord avec le second principe, et avec les remarques primitives d'Engels. Elle représente probablement plus de 90% de tout ce que l'économie consomme et dégrade, tout autant en termes de masse que d'énergie, devenues à ce point de nos travaux de recherche quasiment « indistinctes ».

### 2.5.2.3 Une fonction d'état illustrant le concept de bilan écologique

Ainsi, si nous pouvions prendre en compte, par la formule (37) en termes de stocks, et par la formule (38) en termes de flux, la totalité des composants chimiques de la Biosphère, éléments simples et molécules organiques complexes, alors  $pV$  représenterait leurs stocks globaux différenciés dans la Biosphère (hors Anthroposphère, où ces stocks sont représentés par  $U$ ), et  $d(pV)$  représenterait la totalité des consommations économiques d'énergie biogéochimique du vivant, d'énergie géochimique des matières biogènes, ainsi que la totalité de la pollution (sous forme d'entropie) émise vers les compartiments de la Biosphère.

Le Bilan écologique deviendrait ainsi faisable, dans une rigoureuse cohérence de forme ; sauf à établir une « stœchiométrie des territoires » !

Et nos équations (37) et (38) illustreraient alors tout le concept de bilan écologique !

Ce faisant, à  $d(pV)$  constant, et les variations étant dans tous les sens considérables, qu'est-ce qui établirait la différence globale entre avant et après, notamment entre l'entropie « utile » du vivant, et l'entropie « polluante » de l'économie, quelle que soit l'échelle considérée ?

C'est leur résultante générale, dans la variation positive ou négative de distance à l'équilibre thermodynamique, de l'organisme, de la biogéocénose ou du territoire considéré, jusqu'à la Biosphère tout entière.

D'où l'importance de pouvoir mesurer la distance à l'équilibre thermodynamique du vivant !

### 2.5.2.4 $pV$ , $d(pV)$ et la distance à l'équilibre du vivant

Cette distance à l'équilibre est une fonction de  $pV$ , qui se mesure en joules.

Mais  $G_B + TS = pV$ , l'exergie massique (38).

L'énergie libre et l'entropie ont donc fusionnées ensemble dans l'exergie de la nouvelle matière vivante, ce qui est un juste reflet de la réalité.

Et la distance à l'équilibre est le produit final de leur fusion.

L'exergie  $pV$ , dans sa forme et sa mesure originelle, telle qu'établie dans notre tableau 7 pour l'exemple du glucose, aurait donc vocation, dans ses composantes  $p$  et  $V$  à mesurer la distance à l'équilibre.

L'exergie serait donc déjà « en soi », dans sa densité massique telle qu'elle est mesurée (par des standards internationaux), le produit de la complexité et de la diversité du vivant, de sa structure d'information interne, qui ont manifesté cette propriété particulière de faire fusionner  $G_B$  et  $TS$  dans une nouvelle matière, et de la faire « monter en pression » pour atteindre une distance à l'équilibre donnée.

Mais alors, pourquoi chercher, pour en rendre compte, un facteur de complexité d'information « externe » forcément artificiel, qui serait conjugable avec l'exergie, quand dans sa mesure « standard » (Szargut, et autres, 2005), l'exergie contiendrait « déjà » ce niveau d'information significatif de la biodiversité ?

L'exergie est déjà le résultat de la conjugaison de  $p$  et  $V$  ; pourquoi dès lors conjuguer de nouveau cette conjugaison avec un facteur externe au caractère relatif ?

C'est telle qu'elle se trouve, que l'exergie et sa distance à l'équilibre spécifique sont le produit de ce facteur d'information interne, structurateur et corporificateur de l'énergie libre ; et c'est donc telle qu'elle est « déjà » mesurée que l'exergie doit pouvoir révéler ce facteur.

La question reste de savoir où il se trouve, et d'en rendre compte !

Or, si nous regardons de nouveau le tableau 7, nous pouvons faire deux constats :

- (a) La masse et l'exergie massique restent constantes, en entrée et en sortie.
- (b) Seules les densités massiques ( $1/V$ ) et énergétiques ( $p$ ) manifestent un processus d'intensification énergétique.

Le processus d'intensification que nous donne la formule (38) est donc intervenu quelque part entre les premières et les secondes.

Or tous nos constats du chapitre II ont confirmé le rapport très étroit entre la diversité, son niveau d'information et l'intensification énergétique.

C'est donc en étudiant le rapport entre la masse et la densité massique, ou entre l'exergie et la densité énergétique, que nous devrions pouvoir révéler le facteur d'information « déjà contenu dans  $pV$  » ayant produit la distance à l'équilibre du glucose.

Et c'est en mesurant le niveau de ce facteur d'information que nous devrions pouvoir obtenir la distance à l'équilibre atteinte par la matière vivante.

Nous aurions alors inversé la problématique de Jørgensen !

Reste à le vérifier !

### 2.5.3 Problématique conclusive et objectifs de résolution

Il en ressort une problématique conclusive, fondamentale pour notre thèse :

Quand nous regardons l'exergie, à la fois une masse et une énergie traduisant la formation matérielle du vivant, il apparaît que la complexité et la diversité biologique se traduisent concrètement et essentiellement dans sa densité massique et sa pression énergétique, qui vont exactement dans le même sens.

Ce qui est conforme avec l'ensemble de nos constats au long du chapitre II sur la direction de l'évolution et l'intensification énergétique du vivant ; et notamment le premier principe biogéochimique.

Mais si la pression du vivant exprime sa biodiversité (d'où d'ailleurs l'utilisation du terme « pression de biodiversité »), comment se révèle et se mesure cette biodiversité, sous sa forme structurale ?

Si c'est en niveau « d'information-structure » du vivant, celui-ci devrait alors traduire parfaitement, mais cette fois en « intensité d'information », la direction évolutive de l'intensité énergétique.

C'est à dire que la corrélation entre le sens d'évolution de la distance à l'équilibre thermodynamique ( $D_{ET}$ ), comme variable d'information, et le sens d'évolution de la pression énergétique devrait être parfaite.

Ce qui serait conforme avec nos constats d'ensemble et vérifierait cette fois le second principe biogéochimique, qui combine une approche thermodynamique de l'énergie et une approche informationnelle de la biodiversité.

Ce qui était bien la condition exprimée par la CBD :

Un concept unificateur de la durabilité combinerait les principes de la théorie des écosystèmes et de la biodiversité structurale (...) Essentiellement, cela appelle en faveur d'une Approche Ecosystème Radicale qui combinerait les principes de la théorie des écosystèmes et la thermodynamique de non-équilibre [CBD, 2010:186].

Notre problème, ramené à ses dimensions les plus simples, devient ainsi d'établir une relation entre une pression au sens thermodynamique et une pression de biodiversité au sens statistique et informationnel.

Puis d'élaborer une formule « combinatoire » mesurant la pression énergétique à partir de la dimension informationnelle de la diversité.

### 2.5.3.1 Combiner les approches thermodynamiques et statistiques

Après nos rappels de la section 2 sur les grandeurs extensives et intensives en thermodynamique, nous avons vu dans la partie statistique que la diversité  $\beta$ , vue comme « vraie » diversité, était une grandeur intensive, ou encore une diversité de « différenciation », opposable aux diversités d'inventaire  $\alpha$  et  $\gamma$ , strictement extensives.

La biodiversité ainsi ne s'étend pas comme une quantité, en volume ou masse, mais procède d'une dimension qualitative, au caractère intensif, qui ne dépend pas de la quantité d'une matière, mais est une propriété intrinsèque de cette matière.

Tout aussi bien que l'information peut s'intensifier dans le noyau d'une cellule sans pour autant augmenter sa masse, ou son exergie massique.

Ce qui était bien le cas des facteurs  $\beta$  de Jørgensen, une variable intensive qui, conjuguée avec la valeur extensive de l'exergie massique des organismes (strictement proportionnelle à leur poids), nous donnaient une nouvelle grandeur, *l'éco-exergie*. Mais avec tous les problèmes qu'elle a révélés.

Pouvons-nous trouver une nouvelle expression informationnelle et structurale de la biodiversité, qui jouerait le même rôle que les facteurs  $\beta$ , tout en fonctionnant comme  $p$  par rapport à  $pV$  ?

Ou plus exactement une variable informationnelle qui rendrait compte de la pression  $p$ , en suivant le même sens d'évolution ?

Ce qui représenterait en ce sens, si l'on se souvient bien de ses concepts, la quintessence des attentes de Lotka.

Elle serait « thermodynamiquement compatible », serait conjugable avec le volume d'exergie et mesurerait la distance à l'équilibre ; elle solutionnerait le problème de l'indice  $H'$  de Shannon, dans le sens indiqué par Bonsack (1961).

Et représenterait finalement une alternative aux facteurs  $\beta$ .

Il y avait bien entre la diversité  $\alpha$  et la diversité  $\beta$ , une relation de même nature qu'entre le volume extensif  $V$  et la pression intensive  $p$ .

La diversité  $\beta$  aurait-elle vocation à jouer ce rôle ? Serait-ce pour cette raison que Jørgensen avait choisi le même symbole pour ses facteurs ?

Mais qu'est-ce au fait que la biodiversité ?

### De la diversité à la biodiversité

Nous avons abordé cette question dans notre cahier de recherche n°1 (Loiret, 2012a:11-19). Nous reprendrons ici les citations principales.

Tout d'abord ces passages de l'introduction à la thèse de B.V. Raharinirina :

Historiquement, l'expression « diversité biologique » ou « biodiversité », apparaît au début des années 1980. Ce terme est utilisé pour la première fois lors d'un colloque scientifique organisé en 1986, intitulé *National Forum on BioDiversity* (...). Très vite, plusieurs définitions ont été données à ce terme, notamment à partir des années 1990. Elles dépendent souvent du statut de l'acteur qui le conçoit et sont interprétées différemment selon les groupes sociaux en présence. A ce titre, la définition de la biodiversité pour les scientifiques (biologiste, chimiste, écologiste) n'est pas la même que pour les industriels impliqués (produits pharmaceutiques ou biotechnologies). Cependant, quelles que soient les approches et la complexité de ses définitions, la biodiversité apparaît comme synonyme du « vivant ».

Il y a donc une définition communément admise<sup>163</sup> : « La diversité biologique est la variabilité des organismes vivants de toute origine, y compris, entre autres, les écosystèmes terrestres, marins et autres écosystèmes aquatiques et les complexes écologiques dont ils font partie ; cela comprend la diversité au sein des espèces et entre espèces ainsi que celle des écosystèmes. » (...) Ainsi la biodiversité n'est pas uniquement un ensemble de ressources et de biens utiles pour la consommation de l'homme, c'est l'ensemble de la diversité des espèces, de la diversité des gènes et de la diversité des écosystèmes. Biosphère et biodiversité sont indissociables (Aubertin et Vivien, 1998) [Raharinirina, 2009].

Puis quelques passages de la thèse de C. Da Cunha :

Une des caractéristiques du monde vivant est sa structuration complexe et hiérarchisée. L'étude de la biodiversité s'est construite autour de deux traditions. La première que l'on peut qualifier de naturaliste étudie les composantes de la biodiversité et permet de mieux comprendre la structuration du monde vivant (inventaires et classification des écosystèmes, des flores et des faunes). L'autre, fonctionnaliste, cherche à comprendre le fonctionnement des écosystèmes dans leur globalité et non pas les espèces qui les composent. Ces deux traditions sont complémentaires et ont permis de comprendre la structuration et le fonctionnement de la biodiversité, mais aussi d'estimer son évolution. (...) Ces théories et méthodes des sciences du vivant sont confrontées à des problèmes de mesure, elles n'arrivent malheureusement pas à donner une image complète de la biodiversité. Au-delà d'un manque cruel de données, l'écologie ne dispose pas de théorie générale, globale et unifiée du fonctionnement du vivant qui lui permettrait de répondre à cette question. En découlent des problèmes de mesure de la biodiversité et de son évolution. (...) Des protocoles de monitoring des niveaux structurels de la biodiversité ont déjà été mis en place en Europe et des données utilisables commencent à être collectées. La classification et le stockage des données posent problème. L'informatique est apparue comme l'outil indispensable au stockage, à la gestion et à l'analyse des informations taxinomiques. (...) Le fonctionnement des écosystèmes est encore plus mal connu et demanderait des recherches coûteuses quant au temps et au financement. La notion d'écosystème elle-même est une notion abstraite dont il est difficile de donner une limite spatiale claire. Dans la pratique, les écologues ont tendance à assimiler les écosystèmes à des entités telles que les lacs, les bassins versants ou les massifs forestiers. Il est primordial de mieux connaître les processus écologiques des écosystèmes, les propriétés fonctionnelles de l'écosystème à des niveaux d'organisation différents (stabilité et amplitude des variables d'état telles que la biomasse) et

---

<sup>163</sup> Définition officielle de la Convention pour la Diversité Biologique (CDB).

l'ensemble des services écosystémiques dont l'espèce humaine tire un bénéfice (Gaston, 2000 ; Boero, 2009) (...). Sur le plan théorique, on devrait évaluer tous les aspects de la biodiversité dans un système donné. La quantité de données qui devraient être collectées pour avoir cette connaissance est énorme et aucune mesure universelle n'existe. En pratique, on fait des estimations en se référant à des indicateurs qui peuvent concerner la génétique, les espèces, les peuplements, la structure de l'habitat, etc. Les méthodes utilisées dépendent des objectifs poursuivis. La richesse en espèces, qui peut être déterminée pour l'ensemble des taxons (ou un sous ensemble de taxons) d'un milieu, est la plus courante. On a ainsi abusivement tendance à assimiler richesse en espèces et biodiversité. (...) Le fait que de nombreuses études mettent l'accent sur la richesse spécifique ou la composition de groupes biologiques plus que sur l'abondance ou la biomasse totale des organismes de ces groupes rend plus difficile le lien avec les travaux évaluant le rôle fonctionnel de la biodiversité : les fonctions écologiques et les services écosystémiques sont en effet souvent plus liés à l'abondance des organismes qu'à leur diversité stricto sensu (Le Roux, Barbault et autres, 2008) [Da Cunha, 2010].

### La biodiversité, une diversité de différenciation

Il ressort bien de ces citations que la biodiversité doit être une mesure autrement significative que le seul caractère quantitatif des diversités élémentaires  $\alpha$  et  $\gamma$  (paragraphe 2.2.3.). La définition officielle de la CDB nous en montrait la piste :

La diversité biologique est la *variabilité* des organismes vivants de toute origine ... [CDB].

Cette définition nous ramène à la diversité  $\beta$  vue comme *le niveau de changement dans la composition des communautés*, ou comme *le degré de différenciation des communautés*, en relation avec les changements de milieu.

Nous sommes passés de la diversité extensive à la diversité de différenciation, ou biodiversité, propre à rendre compte des fonctions d'intensification énergétique, justificatives d'une *fonction d'état des écosystèmes*.

Nous ne regardons plus les espèces rares comme autant de tableaux dans un musée, mais une biodiversité « fonctionnelle » illustrant la propension d'un ensemble d'espèces à entretenir la fertilité biologique d'une biogéocénose en utilisant au mieux la complémentarité interspécifique « redox » des cycles biotiques.

#### 2.5.3.2 Pontier les « différentiels » statistiques et thermodynamiques

Et cette biodiversité, à toutes les échelles du vivant, génèrera de la néguentropie (pour autant qu'elle recycle l'entropie des échanges), de l'accumulation énergétique, sous forme de pression montante, au prorata d'un « différentiel » interspécifique, assimilable à un différentiel d'information.

Comment en rendre compte dans une formule ?

Par chance, la thermodynamique énergétique et chimique, quand bien même elle n'observait pas la biodiversité des écosystèmes (sinon nous le saurions), a depuis ses premiers jours assimilé l'énergie à une pression « différentielle » des éléments chimiques.

Le seul problème étant que la thermodynamique est la science de l'équilibre, quand elle devrait bien être plutôt celle de la « distance à l'équilibre », ce qui dit beaucoup.

Déjà, pour Le Chatelier et Gibbs, l'énergie libre, avant même d'être incorporée dans l'exergie, était assimilée à un « différentiel à l'équilibre ».

Etudions pour le constater la notion de potentiel chimique, en ce qu'elle participe directement de la production d'énergie libre.

La formule (24) nous présentait ainsi le potentiel chimique :  $\mu_i = \left(\frac{\partial G}{\partial n_i}\right)_{T,p,n_j}$

Comme l'exergie, G s'exprime en joules. Si maintenant nous mesurons les ni en volume, alors le potentiel chimique n'est rien d'autre qu'une variation infinitésimale (une dérivée partielle) de pV/V, soit d'une infime quantité de joules sur une infime quantité de m<sup>3</sup>, et donc de cette pression p (J/m<sup>3</sup>) qui devenait si importante dans notre tableau 7.

Puis la formule (25) nous présentait ainsi l'énergie libre :  $G = \sum_i n_i \cdot \mu_i$

Il nous apparaît alors que l'énergie libre G, qu'il nous faut plutôt regarder désormais sous sa forme matérialisée d'exergie (28), est la somme d'un nombre n de variations infinitésimales, qui sera d'autant plus grande que ces variations sont importantes, « les unes par rapport aux autres ».

Ainsi l'énergie libre, sous sa forme d'exergie, est, comme la biodiversité, le produit d'une « différentielle ».

La relation entre pression de biodiversité et pression énergétique, qu'établissaient Lotka et Vernadsky depuis les premiers jours du XXe siècle, devient bien plus intime !

Et il ne nous manque que quelques pas pour ponter rigoureusement les différentiels statistiques de la biodiversité, et de l'énergétique.

Pour avancer un peu dans ce « sens », étudions maintenant l'indice D de Simpson mesurant la diversité « statistique », que nous donnait la formule (30) :  $D = \sum_{i=1}^n p_i^2$

Quoi que cet indice mesure l'entropie, comme celui de Shannon, il mesure celle-ci entre 0 et 1, quand H' la mesure entre 0 et log n, autant dire l'infini.

Pour le reste, il représente la somme d'un carré de probabilités Pi, qui sera d'autant plus grande que ces probabilités au carré sont différentes « les unes par rapport aux autres ». Voyons un tout petit exemple de l'évolution de D :

Tableau 8 (figure 30) : Exemple de variation de l'indice D de Simpson

					$D = \sum_{i=1}^n p_i^2$							$D = \sum_{i=1}^n p_i^2$	
					$\Sigma$							$\Sigma$	
1	2	3	4		16	0,063	1	2	3	4		16	0,258
1					1	0,004	1					1	0,004
2					1	0,004	2					2	0,016
3					1	0,004	3					3	0,035
4					1	0,004	4					4	0,063
Un équilibre					1	0,004	Une variété					6	0,141
					1	0,004							
					1	0,004							
					1	0,004							
					1	0,004							
					1	0,004							
					1	0,004							
					1	0,004							
					1	0,004							
					1	0,004							
					1	0,004							
					1	0,004							
					1	0,004							

A somme « constante », surfacique, massique ou tout ce que l'on voudra, D mesure ainsi une différentielle statistique, une variété, une diversité par rapport à un « équilibre statistique », tout comme le potentiel chimique mesurait une différentielle de pression à énergie constante, par rapport à un équilibre mathématique.

Tout comme l'information, qui, quel que soit le nombre de signes, ne signifie rien tant qu'il n'existe pas de différentiel entre les lettres, entre les mots, entre les phrases, entre les paragraphes, entre les nouvelles et les romans, voir même entre les thèses !

Ce qui nous montre bien que l'énergie « utile » est le produit essentiel d'une qualité, incommensurable à la quantité ou à la masse, ... dont elle a cependant besoin pour se manifester, et inversement.

Et que c'est cette qualité, dans sa « densité », que l'Anthroposphère toute entière consomme, bien au delà d'une masse, et d'une énergie, dans « tous les cas » constants.

Nous ne sommes plus des anthropophages, mais nous sommes plus que jamais dans l'histoire de la Terre devenus des « qualitophages », qui mangeons chaque jour plus encore la « qualité du monde ».

Mais nous dérivons...

Pour revenir à notre indice de mesure de l'énergie géochimique du vivant, soit l'énergie *biogéochimique*, il nous apparaît peut être mieux maintenant, ayant un peu plus pénétrés les mystères de la formation de pV, et au sein de cette grandeur, le mystère de l'évolution interne de sa variable de pression p, que l'intensité de cette dernière est d'abord et avant tout le produit d'une variabilité *différentielle* (variable qualitative).

Ce qui nous ramène aux fondamentaux de la thermodynamique, dans toute la « qualité » de leurs interprétations originelles, notamment de l'entropie.

Nous ferons maintenant un dernier pas dans notre rapprochement entre qualité statistique de l'information et qualité de l'énergie, en établissant le rapport entre l'énergie libre, vue comme produit d'une variabilité différentielle et la biodiversité, dans son interprétation statistique.

## 2.5.4 Synthèse conclusive sur la relation exergie/biodiversité

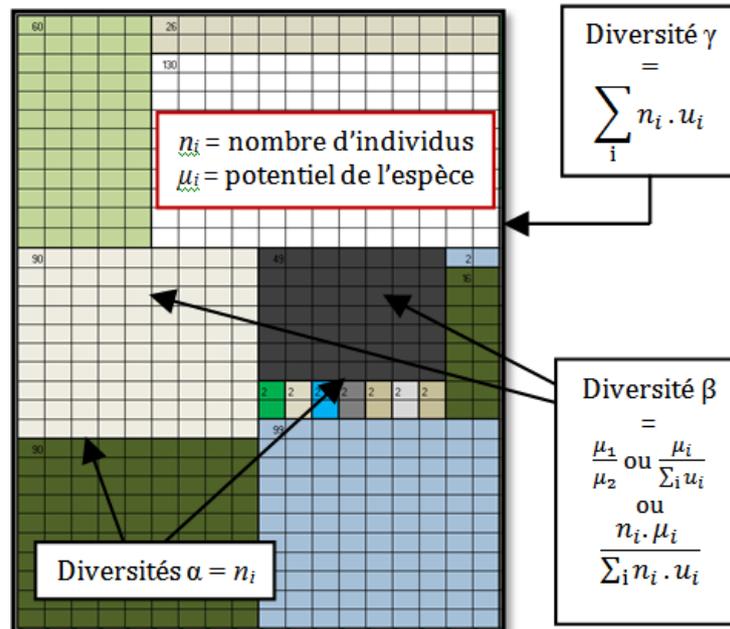
### 2.5.4.1 L'exergie mise en rapport avec les diversités $\alpha$ , $\beta$ et $\gamma$

Souvenons-nous pour ce faire du débat stérile souligné par Marcon sur la décomposition des diversités  $\alpha$ ,  $\gamma$  et  $\beta$  (paragraphe 2.2.3.3.). Nous disions pour notre part qu'il ne s'agissait de rien d'autre dans ce débat, si nous nous inspirons de l'énergétique et le ramenons aux variables d'état thermodynamiques, que de la question relative à la « conjugaison » de grandeurs extensives et intensives, à l'exemple de pV.

Inspirons-nous donc de pV pour tenter de trouver une solution à ce débat qui, en même temps qu'elle pourrait satisfaire ses protagonistes, nous amènerait plus loin vers la résolution de notre problématique conclusive.

Soit la figure suivante :

Figure 31 : Représentation simplifiée des diversités  $\alpha$ ,  $\gamma$  et  $\beta$



Nous avons ici ramené l'expression « différentielle » de la biodiversité à la formule (25) de l'énergie libre étudiée plus haut<sup>164</sup>, ce qui serait bien en soi le summum synthétique de la question de la « directionnalité » de l'évolution, si nous avons bien suivi les propos contextuels introductifs du présent chapitre.

Ce schéma représente la diversité totale d'un écosystème, composé de différentes placettes/espèces, susceptible d'intégrer les différentes diversités  $\alpha$ ,  $\gamma$  et  $\beta$  au sein d'un modèle de calcul cohérent.

Admettons ceci dit que chaque placette de couleur différente représente une espèce d'organisme déterminée, composée d'un certain nombre d'individus, et que chaque espèce a un potentiel chimique identique pour chaque individu de l'espèce (en supposant que nous le connaissions), mais différent d'une espèce à une autre

Puis établissons une analogie mathématique entre cet écosystème et la formule de l'énergie libre d'une molécule établie à partir du potentiel chimique (25) :  $G = \sum_{i=1}^n n_i \cdot \mu_i$

Avec :

$n_i$  le nombre de moles de l'élément  $i$

$\mu_i$  le potentiel chimique par mole de l'élément  $i$

Dans cette analogie, et en rapport à notre schéma :

**Diversité  $\alpha$**  : Elle est formée dans ses sous ensembles par le nombre  $n$  d'individus de chaque espèce d'organisme  $i$  (ou volume de l'espèce  $i$ ), et elle remplacera dans la formule (25) le nombre de moles de l'élément  $i$ .

<sup>164</sup> Nous aurions du prendre l'exergie, mais notre démonstration serait devenue trop plus compliquée.

Et globalement par la somme ( $\sum n_i$ ) des volumes de chaque espèce donnant le volume  $V$  global de l'écosystème. C'est une diversité additive.

**Diversité  $\beta$**  : Présentée comme la *vraie diversité*, elle est formée dans ses sous ensembles par le potentiel chimique  $\mu$  de chaque espèce  $i$ , qui remplacera dans la formule (25) le potentiel chimique molaire de l'élément  $i$ , soit un différentiel infime de pression spécifique de forme  $p = pV/V_i$ , donné par la formule (24) :  $\mu_i = \left(\frac{\partial G}{\partial n_i}\right)_{T,p,n_j}$

Et globalement par le potentiel chimique structural de l'écosystème, qui n'est pas la somme des potentiels chimiques spécifiques de chaque espèce, mais leur résultante globale. Elle nous est donnée par le rapport global des diversités  $\alpha$  et  $\gamma$ , soit :

$$\sum_i n_i \cdot \mu_i / \sum_i n_i \quad (39)$$

La forme globale de la diversité  $\beta = \gamma / \alpha$ , incarne ainsi typiquement la forme  $p = pV/V$ , et serait donc bien comme « diversité différentielle » assimilable à une pression (intensive).

Ou disons plus exactement, pour être fidèles à la formation de l'exergie, que la pression interne d'un écosystème résulterait bien de sa diversité différentielle  $\beta$ , et donc d'une diversité différentielle des niveaux d'information de l'écosystème.

Ce qui instaure dès lors une corrélation potentielle extrêmement étroite entre la pression de biodiversité et la pression énergétique (cf. tableau 7).

Les indices de diversité, ou de distance à l'équilibre, de l'une et de l'autre devraient donc évoluer exactement dans le même sens !

**Diversité  $\gamma$**  : Elle représente la somme, de  $i = 1$  à  $n$ , de la conjugaison des grandeurs  $\alpha$  et  $\beta$  de chaque espèce. Formant l'équivalent de  $pV$ , elle remplacera  $G$  dans la formule  $\sum_{i=1}^n n_i \cdot \mu_i$  (25), et donnera l'énergie libre totale de l'écosystème comme pendant de la diversité totale, qui sera d'autant plus importante que le différentiel de pression interspécifique le sera.

Ce qui nous donne une forme mathématique de cette diversité qui la rend assimilable à la somme des « pressions » spécifiques des espèces de l'écosystème multipliées par leurs « volumes » spécifiques (à ne pas confondre avec pression totale x volume total), et finalement une « biodiversité » mesurée en joules.

Les notions intuitives de pression et de volume de biodiversité avaient ainsi une très bonne raison d'être !

Finalement, la diversité  $\alpha$  sera bien une diversité additive, la diversité  $\beta$  le produit d'une différentielle partielle de pression, et la diversité totale  $\gamma$  une « somme » résultant de la « conjugaison » des deux diversités précédentes. Ce qui résout ainsi le débat souligné par Marcion, en répondant tant au souhait de Whittaker, pour lequel la diversité totale  $\gamma$  devrait être une conjugaison des diversités  $\alpha$  et  $\beta$ , qu'à celui de ses contradicteurs pour lesquels ce devrait être une somme !

Quant à l'enseignement que pour notre part nous tirerons de cette « analogie », c'est que la diversité  $\gamma$ , soit une combinaison «  $\alpha\beta$  » parfaitement assimilable à  $pV$ , présente la même forme mathématique que l'énergie libre de Gibbs !

Ce qui répondrait cette fois tant aux hypothèses de Lotka qu'au second principe biogéochimique de Vernadsky.

Et ce qui établirait le pont recherché entre les différentiels statistiques et thermodynamiques.

Sauf à disposer maintenant d'un indice de diversité « différentielle » qui nous permettra de vérifier la corrélation entre pression de diversité et pression, ou densité, énergétique.

De la forme de l'indice D, il mesurerait le progrès « qualitatif » de l'information dans un écosystème, mais « depuis » le vrai équilibre thermodynamique de la Biosphère (le TS à énergie libre quasi nulle du tableau 7), et non pas « vers » un équilibre jamais atteint (le log n, allant vers l'infini, de l'indice H').

En fait, il mesurerait tout simplement la distance à l'équilibre !

Et deviendrait ainsi une parfaite expression « informationnelle » de la biodiversité, et de sa directionnalité énergétique.

Il serait alors utilisable à toutes les échelles du vivant (donc aussi celle des territoires, comme le recherchait la CBD), et deviendrait « conjugable » à la seule mesure en exergie massique élémentaire de la biomasse<sup>165</sup>, pour nous donner finalement une mesure de l'exergie *biogéochimique*, comme vraie mesure du vivant et de la « biodiversité ».

Ce qui était bien la « qualité » recherchée de notre indice !

#### 2.5.4.2 Diversités structurales, fonctionnelles et biologiques

Utilisons ces clarifications pour tenter, à la fin de ce chapitre, une définition élémentaire des concepts de diversité que nous utiliserons, et surtout chercherons à mesurer, dans la suite de nos travaux sur les actifs écologiques.

**Diversité structurale** : Elle représenterait la mesure différentielle de la **diversité  $\alpha$** , vue comme une simple diversité quantitative (nombres, masses, surfaces ou volumes différents).

**Diversité fonctionnelle** : Elle représenterait la mesure différentielle de la **diversité  $\beta$** , vue comme une diversité qualitative (différence de potentiel chimique, d'exergie, voir simplement de couleur).

**Diversité biologique, ou biodiversité** : Elle représenterait la mesure différentielle de la **diversité  $\gamma$** , vue comme une diversité d'organismes caractérisés par leur surface ou volume spécifique conjugué à leur potentiel chimique, ou à leur exergie spécifique.

Nous étudierons au long du chapitre suivant les solutions que nous proposons à leur mesure.

Fin du chapitre II

---

<sup>165</sup> Dont un indicateur comme la *Net Primary Production* (NPP) a vocation à fournir les bases de calcul (Odum et autres, 1991 ; Amthor et autres, 1998 ; Haberl et autres, 2004, 2007 ; Siche et autres, 2007).

## **.Chapitre III.**

### **Mesurer nos actifs écologiques**

*Le **chapitre III** a pour objectif de répondre aux deux aspects de la seconde composante de notre problématique globale, la mesure de l'énergie biogéochimique de la matière vivante, dans une dimension commune à la nature et à l'économie.*

*Il développe deux hypothèses de résolution de cette (sous)problématique, et à leur suite les propositions relatives à (a) une unité de mesure statistique de la diversité structurale des territoires, puis (b) une unité de mesure thermodynamique de la diversité biologique des écosystèmes, l'exergie  $pV.m$  ; qui sera supposée mesurer la distance à l'équilibre thermodynamique ( $D_{ET}$ ) des organismes et écosystèmes.*

*Après quoi il met en œuvre plusieurs tests de vérification, au regard des propositions significatives antérieures, qui autorisent à priori le développement du système de mesure du Bilan écologique.*

## 3.1 L'indice $K_a$ et la distance à l'équilibre statistique ( $D_{ES}$ )

### 3.1.1 Première hypothèse fondamentale

Nous avons notamment déduit du chapitre II que la diversité  $\gamma$ , une combinaison «  $\alpha\beta$  » assimilable à  $pV$ , avait la même forme mathématique que l'énergie libre de Gibbs, cette analogie étant extensible à l'exergie.

Partant de ce constat, ainsi que de la solution primitive de Bonsack (paragraphe 2.4.1.5.), nous émettons l'hypothèse qu'un indice *statistique* de « distance à l'équilibre » traduisant/mesurant la diversité différentielle  $\beta$  (diversité structurale assimilable à la pression de biodiversité) d'une molécule, d'un organisme, d'un écosystème ou d'un territoire, évoluerait dans le même sens que leurs densifications massiques et énergétiques.

Si nous mettions au point un tel indice, et si notre hypothèse était vérifiée, il rendrait compte, dans le sens positif de son évolution, de la relation directe qu'établissaient l'aromorphose de Sewertzoff, la direction de l'évolution de Lotka, et les principes biogéochimiques de Vernadsky, entre l'évolution de la complexité structurale et informationnelle de la biodiversité, la montée en pression de l'exergie loin de l'équilibre et son accumulation tout au long de l'évolution de la Biosphère, puis de l'Ecosphère.

En sens inverse, un tel indice évoluerait dans le même sens que l'entropie, l'usure de l'exergie et son rapprochement de l'équilibre ; il rendrait donc tout aussi bien compte du second principe de la thermodynamique, exprimé dans nos tableaux stœchiométriques.

Nous étudierons maintenant les conditions d'élaboration de cet indice, avant d'en développer la formule puis de réaliser les différents tests visant à vérifier notre hypothèse.

### 3.1.2 Conditions générales d'élaboration de l'indice recherché

#### 3.1.2.1 Un indice de diversité différentielle, ou *pression de diversité*

Un indice interprète la mesure d'un état constaté du réel. C'est une graduation qui caractérise le niveau de cet état en qualifiant sa position au sein d'un référentiel d'interprétation partagé par le sens commun. Tout comme le thermomètre caractérise par le degré de fièvre un état du corps, en qualifiant le niveau de sa température à l'intérieur des limites admises par un référentiel, ce qui est différent de la seule mesure d'une température qui dans l'absolu peut varier dans des proportions bien plus considérables.

C'est dans notre cas un indice de mesure différentielle quantifiant un état qualitatif, et qui donnera une information significative du niveau de complexité du système en fonction de l'état de ses parties.

Pour citer Bonsack :

Il caractérisera un état macroscopique auquel correspondent un nombre d'états microscopiques différents, différents en ce sens que les molécules n'y sont pas réparties de la même manière (les cellules n'en contiennent pas le même nombre) et leurs vitesses non plus (...) On constitue la collection des états microscopiques différents correspondant à un état macroscopique donné. L'entropie mesure la variété, la diversité de cette collection, ou la variabilité, l'indétermination du type de complexions microscopiques défini par l'état macroscopique [Bonsack, 1961:31].

Ce qui nous donne une bonne définition du potentiel chimique partie de l'énergie libre (25), et, en reportant la différence d'échelle macroscopique/microscopique à la

différence d'échelle écosystème/organisme, peut correspondre à une définition de la diversité  $\beta$  rapportée à un niveau d'entropie.

Cet indice doit ainsi traduire en niveau d'information la complexité différentielle des variables (surface, volume, poids, nombre d'individus, masse d'exergie, etc.) caractérisant l'état des différentes parties du vivant, ou de matière issue du vivant (éléments chimiques, molécules, organismes, espèces, placettes, ...), constitutives de l'ensemble étudié.

Indice que l'on ne peut aucunement comparer à la somme de ces différentes parties<sup>166</sup>.

Pour reprendre l'analogie de notre synthèse conclusive du chapitre II (cf. figure 31 et commentaires), l'exergie totale d'un écosystème est assimilable à sa diversité  $\gamma$  comme somme des exergies massiques spécifiques des différentes espèces multipliées par leur masse ou volume.

Elle représente donc en théorie le *niveau de croissance* de cet écosystème mesuré en exergie. Alors que pourtant, comme nous le montrait le tableau 7, l'exergie massique est constante.

Une masse totale, même d'exergie, ne saurait ainsi exprimer une biodiversité, sinon un éléphant serait comparable aux milliers de souris et autres animaux et organismes de différentes espèces d'un écosystème dont l'exergie massique totale serait identique.

C'est la raison pour laquelle Jørgensen calcule l'exergie spécifique, ou exergie structurale d'un écosystème, en ramenant son exergie totale cumulée à l'exergie moyenne d'une masse élémentaire (gramme ou kilo) de cet écosystème, à partir de la formule (39).

C'est une meilleure « caractérisation », mais elle reste quantitative et non différentielle. En rapportant l'exergie massique de notre éléphant et de nos milliers d'organismes à un kilo ou un décimètre cube, leur exergie structurale resterait la même, et nous n'aurions toujours pas d'indice « qualifiant » la différence entre l'éléphant et l'écosystème constitué par ces milliers d'organismes.

L'exergie totale d'un écosystème représente ainsi l'énergie *géochimique biogène*, qui restera constante, que l'écosystème soit mort (une simple masse de carbone organique d'état uniforme, comme la tourbe) ou vivant.

Alors que cet indice doit caractériser l'énergie *biogéochimique* du vivant, soit une *pression de biodiversité* caractérisant une biodiversité plus ou moins vivante fonction du différentiel de ses états internes, mesurable par une diversité statistique de type  $\beta$ .

### 3.1.2.2 Une diversité loin de l'équilibre

Cet indice doit dans le même temps être conforme à la thermodynamique des structures dissipatives en rendant compte du non-équilibre des structures biologiques.

Soit une fonction d'information significative de leur « création d'ordre à partir de l'ordre », de leur métabolisme et/ou mécanisme de production de néguentropie interne loin de l'équilibre.

Donc une néguentropie de l'information, à l'exemple de la solution de Bonsack !

---

<sup>166</sup> Selon ces mots célèbres : *Le tout est différent de la somme des parties.*

### 3.1.2.3 Une distance à l'équilibre improbable, conforme au second principe

Tout en répondant aux critères de mesure d'une diversité différentielle loin de l'équilibre, cet indice doit représenter une solution à la contradiction fondamentale des mesures statistiques de la diversité biologique, incarnée par l'indice  $H'$  de Shannon.

Il doit donc fonder une mesure de la diversité qui répondra tant au postulat fondamental de la thermodynamique statistique, qu'au second principe de la thermodynamique classique (probabilité maximale de l'entropie).

**C'est à dire une diversité au non-équilibre de plus en plus improbable.**

Ce n'est qu'à cette seule condition que cet indice sera conjugable avec une variable d'état thermodynamique ; conjugaison de laquelle pourra finalement résulter une mesure thermodynamique de la distance à l'équilibre de la matière vivante ou de l'écosystème mesuré.

### 3.1.3 Critères de mise au point

Résumons les conditions d'élaboration de cet indice. Il doit représenter :

- A - Une mesure différentielle de diversité, de type  $\beta$
- B - Une mesure statistique de distance à l'équilibre
- C - Une distance à l'équilibre de plus en plus improbable

#### 3.1.3.1 A - Une mesure différentielle de la diversité, de type $\beta$

**C'est une mesure différentielle de diversité**

Bonsack nous citait les propriétés de cette mesure différentielle à propos d'un état moléculaire :

Il caractérisera un état macroscopique auquel correspondent un nombre d'états microscopiques différents, différents en ce sens que les molécules n'y sont pas réparties de la même manière (les cellules n'en contiennent pas le même nombre) et leurs vitesses non plus [Bonsack, 1961:31].

Et la *fonction d'état des écosystèmes*, représentée par les formules (37) et (38) nous montrait que, à  $pV$  constant, cette variabilité de la différence des états était assimilable à une variation de pression/volume, ou néguentropie/entropie.

L'indice  $H'$  de Shannon répond parfaitement à cette exigence de mesure différentielle d'une variabilité, raison première de son utilisation généralisée comme mesure de la diversité  $\beta$ .

Mais il mesure par contre, comme nous l'avons vu (paragraphe 2.4.1.4.) le contraire d'une distance à l'équilibre, tout comme l'indice  $E$  de Simpson (30).

Quant à l'indice  $D$  de Simpson (30), il mesure aussi cette variabilité, et de manière « parfaite », mais sans aucune référence à l'équilibre.

Nous utiliserons ses propriétés différentielles, mais de telle manière à ce qu'il devienne une mesure de distance à l'équilibre.

### C'est une mesure de diversité $\beta$

Marcon (2011:25) nous dit que toutes les diversités  $\beta$  ont en commun :

- Une définition de la diversité et de la mesure de la diversité.
- Une façon de combiner les diversités  $\alpha$  et  $\gamma$  pour obtenir la diversité  $\beta$ , comme par exemple  $\beta = \gamma/\alpha$ .

Ce qui fut bien tout l'objet de notre paragraphe 2.5.3., ainsi que de notre analogie entre biodiversité et énergie libre  $G$ , du paragraphe 2.5.4.

#### 3.1.3.2 B - Une mesure statistique de distance à l'équilibre

##### C'est une distance à l'équilibre statistique

L'équilibre statistique, qui permet la mesure des entropies statistiques de Boltzmann et Shannon, est donné comme équivalent à «  $1/n$  », où  $n$  est le nombre de complexions étudiées, leur collection, dans les calculs de probabilités des formules du type (29) et (30).

Il est en effet démontré que quand toutes les probabilités  $p_i$  sont égales, le résultat de ces formules nous donne  $1/n$ , qui représente l'équiprobabilité parfaite, donc une entropie maximale où le différentiel (de masse, de potentiel chimique, d'exergie ...) entre chaque complexion  $i$ , au nombre allant de 1 à  $n$ , est égal à 0.

L'équilibre  $1/n$  est cependant relatif à un environnement de référence spécifique donné par  $n$ . Débutant avec au moins deux complexions différentes, il commence à 0,5 et tend vers 0 avec l'augmentation de  $n$ .

N'autorisant pas la comparaison entre des systèmes composés d'un nombre  $n$  de complexions différent, l'indice devra ramener l'équilibre  $1/n$  à 0, l'équilibre statistique absolu, pour obtenir un environnement de référence universel.

0 constituera alors le point d'origine de l'équilibre parfait à partir duquel pourra être tracé un segment de droite le joignant à un autre point donnant le niveau de l'indice, formant ainsi entre les deux une « distance à l'équilibre ».

##### C'est un rendement d'éloignement de l'équilibre entre 0 et 1

Nous avons vu la nécessité de juger la « pertinence » d'un indice par son inscription dans un cadre de référence commun permettant la comparaison interne et externe des résultats obtenus.

La pratique a toujours établi de tels indices d'efficacité, à l'exemple d'un rendement (de 0 à 1), ou une échelle de notation (de 0 à 7, 10, 20), etc.

L'indice  $H'$  de Shannon, dont le maximum tend vers l'infini d'un «  $\log n$  » dont on ne peut connaître les bornes, ne peut permettre une telle comparaison. C'est pourquoi les mesures de diversité classiques introduisent un rendement de cet indice en mesurant le rapport entre la valeur  $H'$  résultant des mesures effectuées, et l'entropie maximale ( $H'_{max}$ ) que pourrait atteindre le nombre  $n$  d'espèces ou de placettes étudié à l'équilibre (Marcon, 2011:22).

C'est à dire  $H' / H'_{max}$ , qui nous donne un rendement (une efficacité) compris entre 0 et 1.

Mais  $H'_{max}$  étant l'équiprobabilité, et  $H'$  s'en rapprochant, ce rapport devient un « rendement d'équitabilité » (ou d'équiprobabilité), que nous pouvons comprendre

comme un rendement de « rapprochement de l'équilibre » ( $1/n$ ), l'équilibre étant égal à  $\log n$  pour Shannon et 1 pour l'indice E (30) de Simpson (Marcon, 2011:22).

La question sera pour nous de voir comment, à partir de l'indice D de Simpson, transformer ce rendement d'équitabilité en son inverse, soit une efficacité de « l'éloignement de l'équilibre ». Donc un rendement, compris entre 0 et 1.

### 3.1.3.3 C - Une distance à l'équilibre conforme au second principe

Nous avons vu que l'indice de Shannon était conforme au postulat fondamental de la physique statistique, mais qu'il ne l'était pas vis à vis du second principe de la thermodynamique : une probabilité maximale de l'entropie et de l'équilibre. D'où les échecs constatés de Jørgensen.

Cet indice devra donc intégrer dans une même formule l'équilibre  $1/n$  et la distance 0 à 1 pour répondre à ces deux conditions.

Il devrait finalement mesurer un niveau d'improbabilité s'éloignant de l'équilibre, conformément au second principe et à la théorie des structures dissipatives.

Cette conformité devrait le rendre conjugable avec une variable d'état thermodynamique d'un organisme ou d'un écosystème, et ainsi permettre de :

« Mesurer une distance à l'équilibre thermodynamique »

### 3.1.4 L'indice $K_a$ de distance à l'équilibre

#### 3.1.4.1 Formulation de l'indice

##### Partie 1 : L'équilibre $E_e$

L'équilibre statistique ( $E_e$ ), qui représente l'environnement de référence, nous est donné, comme nous l'avons vu (29), par  $1/n$ . Cet environnement de référence est relatif à  $n$ .

##### Partie 2 : La diversité différentielle $D_1$

Critères : C'est un indice  $\beta$  de diversité ; il croît avec la diversité des configurations, complexions ou espèces ; il mesure la « variabilité » sous une forme « différentielle ».

Cette partie de l'expression sera représentée par  $D_1$ , qui mesure la diversité différentielle, mais sans référentiel. Nous avons conclu à une formule identique à Simpson (30), soit :

$$D_1 = \sum_{i=1}^n p_i^2$$

Nous avons cependant abouti à cette même formule en partant d'hypothèses très différentes ( $D_0 = \sum p(i^2)$  puis  $D_1 = D_0/\sum i = \sum pi^2$ ) . Elle s'est avérée après de nombreux tests, dans les seuls termes de « différentielle », une bien meilleure formule que celle de Shannon ( $-\sum pi \log pi$  (29)), et représente une « perfection » en termes combinés de simplicité et d'efficacité.

##### Partie 3 : La distance absolue à l'équilibre $D_2$

Il faut maintenant transformer  $D_1$  en une véritable distance à l'équilibre, statistique, qui sera représentée par  $D_2$ . Or la variation de  $D_1$  est relative à  $1/n$ , c'est à dire au nombre  $n$  de configurations, espèces ou placettes. Et  $D_1$  n'est pas comme tel comparable à d'autres ensembles/écosystèmes, du même environnement/territoire, qui auraient un nombre de configurations/espèces différents. Il faut donc rendre cette distance  $D_2$  absolue vis à vis de l'équilibre statistique ( $E_e$ ) relatif à  $n$ , c'est à dire la mesurer vis à vis d'un environnement de référence universel.

Critère : C'est la distance absolue entre la diversité  $D_1$  et l'équilibre statistique, relatif à  $n$ . Cette mesure nous sera donnée par  $D_2 = D_1 - E_e$ , soit :

$$D_2 = \sum_{i=1}^n p_i^2 - \frac{1}{n}$$

##### Partie 4 : La distance absolue maximale à l'équilibre $D_{2max}$

Si  $D_2$  est la distance absolue à l'équilibre statistique, elle n'est pas en l'état comparable à la distance maximale à l'équilibre  $D_{2max}$ , qui en théorie vaut 1. En effet, cette distance maximale est elle aussi relative au nombre  $n$  de configurations/espèces. C'est pourquoi il faut rendre elle aussi absolue cette distance maximale à l'équilibre.

La distance absolue maximale à l'équilibre  $D_{2max}$  sera égale à  $1 - (1/n)$ .

### L'Indice $K_a$ de distance à l'équilibre statistique : $D_{ES} = D_2/D_{2max}$

La distance à l'équilibre statistique  $D_{ES}$  sera vue finalement comme le rapport d'efficacité, ou rendement, entre la distance absolue constatée  $D_2$  et la distance maximale absolue  $D_{2max}$ , c'est à dire le rapport  $D_2/D_{2max}$ .

Ce qui nous permet de boucler la construction de l'indice  $K_a$  par la formule :

$$K_a = \frac{\sum_{i=1}^n p_i^2 - \frac{1}{n}}{1 - \frac{1}{n}}$$

©R.Loiret 2012

(40)

On regardera l'illustration de la figure 32 pour une meilleure compréhension.

#### Etendue de l'indice $K_a$ :

- $K_a = 0$  quand  $n = 1$  et  $p_i$  est différent de 0, soit une probabilité de 1, ou quand  $n > 1$  et tous les  $p_i$  sont égaux, c'est à dire équiprobables ( $1/n$ ). Ce qui représente les situations les plus certaines. Sinon  $K_a$  est positif.
- Quand  $n > 1$ ,  $K_a$  tend d'autant plus vers 1, le maximum, que les  $p_i$  différents de zéro sont différents l'un de l'autre. Ce qui représente des situations de plus en plus incertaines<sup>167</sup>.

#### Nous pouvons comparer son étendue avec celle de l'indice $H'$ de Shannon (20) :

- $H' = 0$  si, et seulement si, tous les  $p_i$  sauf un sont égaux à zéro, celui-ci ayant la valeur un. Sinon  $H'$  est positif.
- $H'$  est maximum et égal à  $\log n$  quand tous les  $p_i$  sont égaux, c'est à dire équiprobables ( $1/n$ ). Ce qui est la situation la plus incertaine.

#### Et avec celle de l'indice « E » de Simpson (30) :

- $E = 0$  si, et seulement si, tous les  $p_i$  sauf un sont égaux à zéro, celui-ci ayant la valeur un. Sinon  $E$  est positif.
- $E = 1$ , le maximum quand tous les  $p_i$  sont égaux (c'est à dire  $1/n$ ) et  $n$  est infini.

#### Unité de mesure de l'indice $K_a$ :

Son étendue allant de 0 à 1, l'unité de mesure de la distance à l'équilibre statistique est par définition le mètre. Mais c'est une distance « intensive », non additive, qui résulte d'une pression différentielle de diversité. Comme la pression, elle ne saurait donc être cumulée.

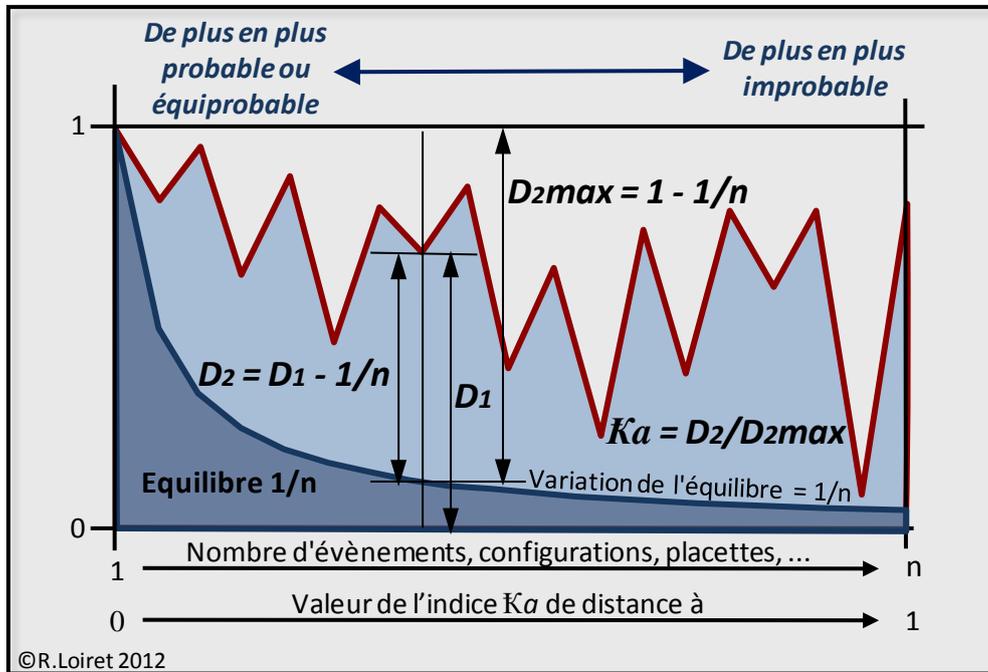
---

<sup>167</sup> Le diamant (et mieux encore le « buckminsterfullerène ») semble répondre à ces conditions avec un indice  $K_a$  extrêmement proche de 1 pour  $n = 2$ , mais il aura fallu au minimum trois milliards d'années pour le produire. Il semble de même répondre à la formule de Nernst (entropie nulle d'un cristal parfait au zéro absolu) du 3<sup>ème</sup> principe de la thermodynamique.

### 3.1.4.2 Illustration, représentation et calcul de l'indice $K_a$

#### Illustration comparative des variations des indice $K_a$ et $H'$ (Shannon)

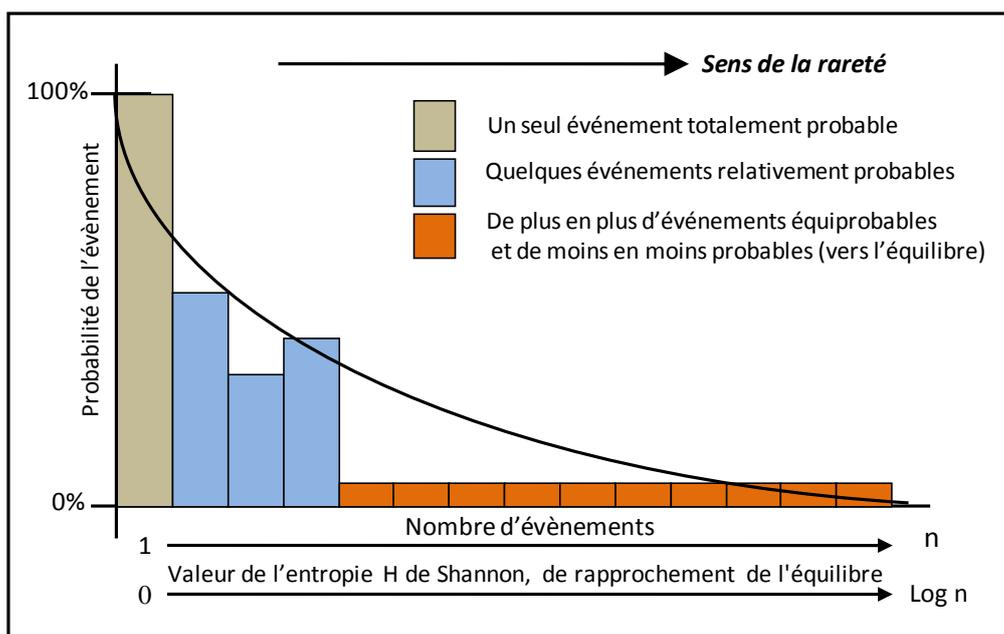
Figure 32 : Illustration des variations de l'indice  $K_a$



Nous pouvons constater une variation telle de l'indice  $K_a$ , qu'il s'éloigne de plus en plus de l'équilibre, au prorata du nombre de placette et de leur différentiel.

Ceci quand au contraire l'indice de Shannon s'en rapproche sans cesse.

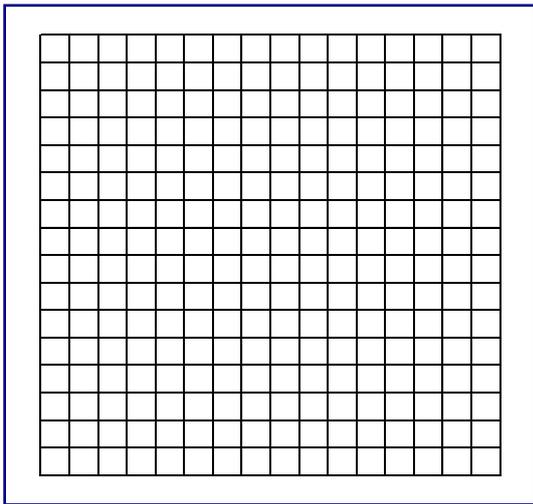
Figure 33 : Illustration des variations de l'entropie de Shannon



### Représentation 2D et calcul de l'indice (exemples)

Une fois tous les éléments de son calcul précisés, il devient très simple de le calculer.

Figure 34 : Représentation 2D et calcul de l'équilibre statistique  $1/n$



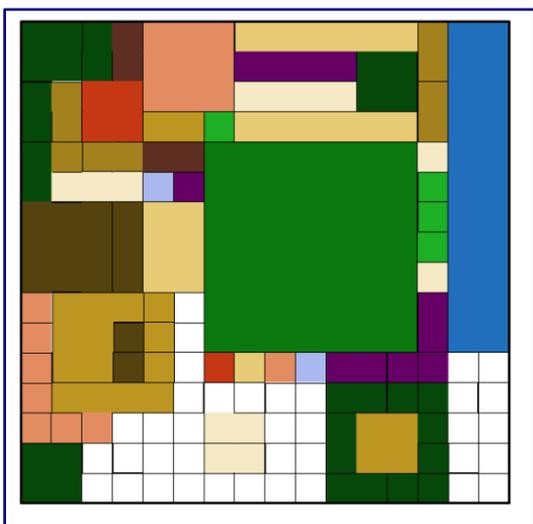
Equilibre  $E_e = 1/n$  (entropie maximale)

Dans ce cas,  $n = 16 \times 16 = 256$

$$E_e = 1 / 256 = 0,0039$$

$$(D_1 = E_e, D_2 = 0 \text{ et } \mathbb{K}_a = 0)$$

Figure 35 : Représentation 2D et calcul de l'indice  $\mathbb{K}_a$  d'une diversité structurale  $\beta$



Soit  $n$  un nombre d'espèces, ou de surfaces d'une nomenclature territoriale (CLC, ...)

Dans ce cas,  $n = 37$ ,  $E_e = 0,0270$

Les  $p_i$  sont les nombres d'individus par espèce ou les surfaces par code de nomenclature

$$D_1 = \sum_{i=1}^n p_i^2 = 0,0800$$

(voir calcul détaillé page suivante)

$$D_2 = D_1 - E_e = 0,0530$$

$$D_{2max} = 1 - E_e = 0,973$$

$$\mathbb{K}_a = D_2 / D_{2max} = 0,0544$$

Tableau 9 (figure 36) : Détails de calcul, et variations de l'indice  $K_a$

$Ka = D_2/D_2max$	$Ka$	$Ka$	$Ka$	$Ka$	$Ka$	$Ka$	$Ka$
0,0000	0,0000	0,3015	0,5616	0,0000	0,4240	0,0544	
$D_2max$ 0,0000	$D_2max$ 0,5000	$D_2max$ 0,7500	$D_2max$ 0,8750	$D_2max$ 0,9375	$D_2max$ 0,9375	$D_2max$ 0,9730	
$D_2 = Di - 1/n$ 0,0000	$D_2$ 0,0000	$D_2$ 0,2261	$D_2$ 0,4914	$D_2$ 0,0000	$D_2$ 0,3975	$D_2$ 0,0530	
$Ee = 1/n$ 1,0000	$Ee$ 0,5000	$Ee$ 0,2500	$Ee$ 0,1250	$Ee$ 0,0625	$Ee$ 0,0625	$Ee$ 0,0270	
$D_1 = \Sigma pi^2$ 1,0000	$D_1$ 0,5000	$D_1$ 0,4761	$D_1$ 0,6164	$D_1$ 0,0625	$D_1$ 0,4600	$D_1$ 0,0800	
$\Sigma$ 37	$\Sigma$ 20	$\Sigma$ 127	$\Sigma$ 480	$\Sigma$ 160	$\Sigma$ 2020	$\Sigma$ 256	
n=1	n=2	n=4	n=8	n=16	n=16	n=37	
	10 0,25	75 0,3488	25 0,0027	10 0,004	120 0,0035	10 0,0015	
	10 0,25	5 0,0016	5 0,0001	10 0,004	5 0,0000	5 0,0004	
		45 0,1256	4 0,0001	10 0,004	4 0,0000	4 0,0002	
		2 0,0002	2 0,0000	10 0,004	30 0,0002	2 0,0001	
			369 0,5910	10 0,004	10 0,004	9 0,0012	
			2 0,0000	10 0,004	2 0,0000	2 0,0001	
			1 0,0000	10 0,004	1 0,0000	1 0,0000	
			72 0,0225	10 0,004	25 0,0002	2 0,0001	
				10 0,004	1 0,0000	1 0,0000	
				10 0,004	1 0,0000	1 0,0000	
				10 0,004	12 0,0000	6 0,0005	
				10 0,004	4 0,0000	4 0,0002	
				10 0,004	1250 0,3829	4 0,0002	
				10 0,004	4 0,0000	4 0,0002	
				10 0,004	6 0,0000	6 0,0005	
				10 0,004	546 0,0731	4 0,0002	
						49 0,0366	
						22 0,0074	
						1 0,0000	
						6 0,0005	
						12 0,0022	
						4 0,0002	
						4 0,0002	
						4 0,0002	
						14 0,0030	
						2 0,0001	
						7 0,0007	
						4 0,0002	
						12 0,0022	
						6 0,0005	
						3 0,0001	
						36 0,0198	
						1 0,0000	
						1 0,0000	
						1 0,0000	
						1 0,0000	
						1 0,0000	

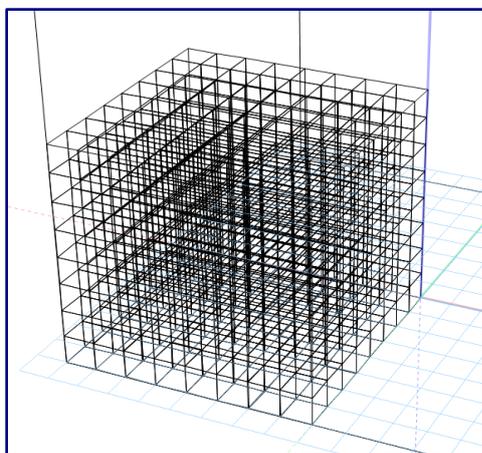
**Equilibre**  
 $Ee = 1/n$   
 L'équilibre diminue avec le nombre n d'espèces ou de placettes.  
 $Ka = 0$  quand  $D_1 = 1/n = Ee$

Calcul de l'exemple page précédente →

Représentation de l'équilibre et d'une diversité  $\beta$  en 3D

Figure 37 : Représentation de l'équilibre et d'une diversité  $\beta$  en 3D

L'équilibre (entropie maximale)



La diversité  $\beta$



### 3.1.5 L'indice $K_a$ mesure la diversité structurale : vérifications

Dans une application directe, non thermodynamique, de nature statistique, isolé ou conjugué avec une variable élémentaire (masse, surface, volume, ...), l'indice  $K_a$  de distance à l'équilibre a une vocation potentielle tout aussi générale que l'entropie de Shannon, sauf à mesurer la rareté du vivant, l'inverse d'une rareté proche de l'équilibre.

A ce stade, il mesurera alors la diversité (différentielle) « structurale », pour laquelle nous identifions au moins deux grands domaines d'utilisation.

#### 1 - La mesure de la diversité structurale (2D et 3D) d'un espace/territoire

Elle s'exprime dans toutes les dimensions de la Biosphère et de l'Ecosphère, à toutes les échelles, et est susceptible d'être mesurée dans toutes ces dimensions.

A titre d'exemple, nous avons mesuré la diversité structurale et la distance à l'équilibre de l'atmosphère, et son évolution potentielle vers l'équilibre, en nous basant sur ses quinze composantes chimiques principales + l'humidité.

Elle s'exprime de même (ou non), en relation (ou non) avec la diversité structurale des espaces naturels, dans toutes les dimensions géométriques des arts et techniques de la société (urbanisme, architecture, paysages urbains et ruraux, espaces naturels travaillés par l'homme, sculpture, peinture, dessin, ...).

Nous développerons au paragraphe suivant un exemple directement utile au système de mesure du Bilan écologique, et tel que nous l'avons appliqué à notre territoire de référence, le Parc Naturel Régional des Préalpes d'Azur.

#### 2 - La mesure de la diversité structurale de l'information

Il existe à priori une diversité structurale dans tous les domaines des sciences naturelles et biologiques (on pensera notamment à l'ADN et à tout ce qui peut participer de l'organisation-structure des molécules et organismes), ainsi que des sciences sociales, où l'information peut entrer en compte et être évaluée.

Supposée refléter, dans la nature, la transformation de l'information-structure en pression de diversité et distance à l'équilibre, la vocation élémentaire de l'indice  $K_a$  sera de vérifier l'aromorphose et la directionnalité de l'évolution dans toutes les manifestations de la diversité.

Sauf à le vérifier !

Rapporté à notre propos, cela suppose d'établir une corrélation très étroite entre :

- D'une part, l'indice  $K_a$  de diversité structurale de la masse des éléments chimiques moléculaires, ou des constituants organiques d'écosystèmes et territoires naturels.
- De l'autre leur densité massique, en ce qu'elle résulte de la pression opérée sur ces mêmes masses par l'énergie libre incorporée.

L'indice  $K_a$  vérifierait ainsi, tout autant qu'il serait vérifié par, ce principe de « réduction » par lequel les autotrophes de l'Ecosphère transforment leur diversité structurale moléculaire et organique (information-structure) en force de pression énergétique et de densification de leurs masse de carbone-bois (cellulose, hémicellulose, lignine); force qui se manifeste visiblement par la structuration des habitats écosystémiques.

Nous établirons cette corrélation dans un second paragraphe.

Avoir une corrélation très forte et vérifier une telle propriété de l'indice nous autoriserait alors à envisager sa conjugaison avec une variable énergétique, afin de mesurer la diversité biologique, ou dit autrement, la distance à l'équilibre « thermodynamique » de la diversité.

### 3.1.5.1 Mesurer la diversité structurale d'un territoire : Le cas du PNRPA<sup>168</sup>

Prenons la figure 35 et considérons que celle-ci représente la diversité du paysage et/ou des écosystèmes d'un territoire quelconque (que l'on peut aussi la représenter en 3D).

Caractérisons cette diversité par une nomenclature propre aux écosystèmes. La plus connue en Europe est la nomenclature Corine Land Cover (CLC), qui couvre tous les types d'espaces (naturels, ruraux, urbains,...) et comprend 44 postes. Nous obtiendrons ainsi pour chaque poste de CLC une surface déterminée en multiples de  $m^2$  à l'ensemble desquelles nous pourrions appliquer la formule (40)<sup>169</sup>.

Notons à cet endroit que, si pour chacun des mêmes postes de CLC, nous prenions d'autres variables « extensives » comme des  $m^3$  ou des tonnes de terre (d'une quantité identique pour chaque  $m^2$  de surface), nous pourrions appliquer la même formule ; et nous obtiendrions alors un résultat parfaitement identique.

En conjuguant ensuite l'indice obtenu (une variable intensive), partie d'un mètre de hauteur, avec ces mêmes surfaces en  $m^2$  (variable extensive) nous obtiendrons des «  $m^3$  » de diversité, que pour différencier des  $m^3$  normaux, nous avons nommés des  $Km^3$ . A l'échelle de l'hectare ( $1 \text{ ha} = 1 \text{ hm}^2$ ), nous aurons donc des hectomètres cubes ( $\text{hm}^3$ ) de diversité, que nous avons nommés des  $hKm^3$ , etc.

Notons que, issus d'une conjugaison entre une variable intensive et une variable extensive, ces  $hKm^3$  forment une nouvelle variable extensive tendant vers l'équilibre, qu'il est possible de sommer, alors qu'il ne saurait être question de sommer les indices !

Ce qui nous permet dans une première étape de comparer la diversité « structurale » de tout territoire à une échelle prise en compte par CLC.

Dans une seconde étape, comme la mise à jour de CLC se fait sur des périodes de plus en plus courtes (bientôt deux ans), nous pourrions calculer de manière très « précise et globale » les variations diverses d'occupation des sols entre deux périodes de mise à jour.

Les évolutions temporelles des postes de Corine Land Cover sur un même territoire (Land Cover changes) sont en effet considérées aujourd'hui comme une mesure d'impact fondamentale de l'économie sur la soutenabilité des territoires<sup>170</sup>. Mais ces changements aux causes variées ne sont pas cumulables, et sont donc analysés poste par poste, sans leur donner de signification globale, et sans pouvoir les comparer à d'autres territoires.

Transformés en  $hKm^3$ , ces changements temporels élémentaires deviennent cumulables en un indice unique de diversité « structurale » de l'espace traduisant « un sens de l'évolution » immédiatement interprétable.

<sup>168</sup> Il s'agit plus exactement du territoire des ses communes adhérentes, cf. Territoire de référence au chapitre IV.

<sup>169</sup> Nous avons établis une table de correspondance entre CLC et la nomenclature EUNIS pour les habitats naturels, qui nous permettrait de décrire des sous niveaux écosystémiques beaucoup plus fins. La valeur de l'indice  $K_s$ , qui permet d'intégrer de multiples sous niveaux, évoluerait positivement au prorata.

<sup>170</sup> EeA Report No 11/2006 - Land accounts for Europe 1990 –2000 - Towards integrated land and ecosystem accounting.

Étudions maintenant notre exemple pilote.

Nous avons réalisé nos premiers tests surfaciques de mesure de la diversité structurale sur notre territoire de référence, les 49 communes du PNRPA, dont la surface cumulée est de 103.949 hectares. Sur la base des relevés CLC disponibles pour la France à l'échelle communale, nous avons tout d'abord calculé le « volume de diversité » ( $\text{hKm}^3$ ) de chaque commune, et son évolution, comme le montre le tableau suivant pour la commune de Vence (06140).

Tableau 10 (figure 38) : Indice  $K_a$  et évolution de la diversité structurale d'une commune selon CLC

		CLC 1990		CLC 2006		$\Delta$ 1990-2006
<b>Commune de Vence (06140)</b>		$K_a * \Sigma ha = hKm3$	<b>4,494</b>	$K_a * \Sigma ha = hKm3$	<b>4,268</b>	<b>-5,04%</b>
		$K_a = D_2 / D_2max$	<b>0,114</b>	$K_a = D_2 / D_2max$	<b>0,108</b>	
		$D2max = 1 - 1/n$	0,909	$D2max = 1 - 1/n$	0,900	
		$D_2 = D_1 - 1/n$	0,104	$D_2 = D_1 - 1/n$	0,097	
		$1/n$	0,091	$1/n$	0,100	
		$D_1 = \Sigma(\pi i^2) / \Sigma ha$	<b>0,195</b>	$D_1 = \Sigma(\pi i^2) / \Sigma ha$	<b>0,197</b>	
Code CLC	Nomenclature Corine Land Cover	<b>3.942</b>		<b>3.942</b>		
111	Tissu urbain continu	35	0,00008	35	0,00008	
112	Tissu urbain discontinu	956	0,05883	991	0,06321	
121	Zones industrielles et commerciales	-	-	-	-	
122	Réseaux routier et ferroviaire et espaces associés	-	-	-	-	
123	Zones portuaires	-	-	-	-	
124	Aéroports	-	-	-	-	
131	Extraction de matériaux	-	-	-	-	
132	Décharges	-	-	-	-	
133	Chantiers	-	-	-	-	
141	Espaces verts urbains	-	-	-	-	
142	Equipements sportifs et de loisirs	-	-	-	-	
211	Terres arables hors périmètres d'irrigation	-	-	-	-	
212	Périmètres irrigués en permanence	-	-	-	-	
213	Rizières	-	-	-	-	
221	Vignobles	-	-	-	-	
222	Vergers et petits fruits	-	-	-	-	
223	Oliveraies	-	-	-	-	
231	Prairies	-	-	-	-	
241	Cultures annuelles associées aux cultures permanentes	-	-	-	-	
242	Systèmes culturaux et parcellaires complexes	28	0,00005	30	0,00006	
243	Surfaces essentiellement agricoles, interrompues par des espaces na	12	0,00001	-	-	
244	Territoires agro-forestiers	-	-	-	-	
311	Forêts de feuillus	538	0,01861	521	0,01746	
312	Forêts de conifères	73	0,00034	70	0,00031	
313	Forêts mélangées	571	0,02100	567	0,02068	
321	Pelouses et pâturages naturels	1.134	0,08276	1.134	0,08276	
322	Landes et broussailles	-	-	-	-	
323	Végétation sclérophylle	65	0,00027	65	0,00027	
324	Forêt et végétation arbustive en mutation	98	0,00062	98	0,00062	
331	Plages, dunes et sable	-	-	-	-	
332	Roches nues	-	-	-	-	
333	Végétation clairsemée	432	0,01200	432	0,01200	
334	Zones incendiées	-	-	-	-	
335	Glaciers et neiges éternelles	-	-	-	-	
411	Marais intérieurs	-	-	-	-	
412	Tourbières	-	-	-	-	
421	Marais maritimes	-	-	-	-	
422	Marais salants	-	-	-	-	
423	Zones intertidales	-	-	-	-	
511	Cours et voies d'eau	-	-	-	-	
512	Plans d'eau	-	-	-	-	
521	Lagunes littorales	-	-	-	-	
522	Estuaires	-	-	-	-	
523	Mers et océans	-	-	-	-	

Nous pouvons constater que l'indice  $D_1$  (identique à Simpson) augmente entre 1990 et 2006 ( $0,195 > 0,197$ ), alors que l'indice  $K_a$  diminue ( $0,114 > 0,108$ ). Le seul calcul de  $D_1$ , une entropie sans distance à l'équilibre, aurait donc faussé, comme l'aurait fait celui de Shannon, l'interprétation du sens d'évolution de la diversité structurale de la commune, qui de toute évidence « tend vers l'équilibre statistique », avec tout ce que cela implique.

Notons par ailleurs que la diversité structurale, basée sur CLC, prend ici en compte aussi bien les espaces ruraux que les espaces urbains, qui ont leur diversité propre. La seule mesure de la diversité rurale, pour peu que nous ayons une nomenclature plus détaillée, aurait changé plus encore cette évolution en défaveur des espaces ruraux (et naturels).

L'indice  $D_1$  ne nous aurait d'autre part pas permis d'obtenir, compte tenu de la variabilité du nombre de postes constatés de CLC pour chaque commune (variabilité de l'équilibre  $1/n$ ), une valeur globale de l'indice cohérente pour toutes les valeurs locales.

L'indice  $K_a$  nous permet ainsi tous les changements d'échelle.

Et surtout nous permet, en obtenant une variable homogène quel que soit le territoire, de « sommer » les  $hKm^3$  de chaque commune, pour avoir la distance à l'équilibre statistique globale (en  $hKm^3$ ) de l'ensemble des communes du PNRPA.

Tableau 11 (figure 39) : Indice  $K_a$  et diversité structurale individuelle et globale des communes du PNRPA

	ha	1990		2006	-4,67%
		Indice $K_a$	$hKm^3$	Indice $K_a$	$hKm^3$
<b>COMMUNES PNRPA</b>	<b>103.949</b>	<b>0,2079</b>	<b>216,10</b>	<b>0,1982</b>	<b>206,00</b>
1 AIGLUN	1.546	0,095	1,474	0,095	1,474
2 AMIRAT	1.292	0,280	3,614	0,280	3,614
3 ANDON	5.440	0,140	7,626	0,138	7,487
4 ASCROS	1.752	0,203	3,566	0,203	3,566
5 BEZAUDUN-LES-ALPES	2.159	0,299	6,452	0,160	3,453
6 BONSON	669	0,101	0,676	0,099	0,659
7 BOUYON	1.246	0,250	3,109	0,250	3,109
8 BRIANCONNET	2.474	0,072	1,782	0,067	1,650
9 CABRIS	537	0,117	0,626	0,154	0,827
10 CAILLE	1.703	0,208	3,544	0,201	3,427
11 CARROS	1.542	0,065	1,002	0,063	0,967
12 CAUSSOLS	2.767	0,163	4,518	0,196	5,422
13 CIPIERES	3.843	0,300	11,526	0,169	6,497
14 COLLONGUES	1.084	0,255	2,766	0,255	2,766
15 CONSEGUDES	1.259	0,227	2,858	0,227	2,858
16 COURMES	1.600	0,267	4,275	0,261	4,172
17 COURSEGOULES	4.138	0,296	12,252	0,288	11,904
18 CUEBRIS	2.299	0,385	8,856	0,321	7,383
19 ESCRAGNOLLES	2.643	0,104	2,745	0,071	1,871
20 GARS	1.551	0,333	5,168	0,337	5,233
21 GATTIERES	1.015	0,083	0,845	0,088	0,893
22 GILETTE	1.044	0,259	2,704	0,259	2,704
23 GOURDON	2.280	0,280	6,388	0,247	5,624
24 GRASSE	4.442	0,075	3,347	0,088	3,894
25 GREOLIERES	5.264	0,151	7,941	0,149	7,861
26 LA PENNE	1.805	0,293	5,284	0,287	5,185
27 LE BAR-SUR-LOUP	1.430	0,128	1,836	0,110	1,566
28 LE BROC	1.843	0,192	3,538	0,191	3,519
29 LE MAS	3.247	0,230	7,463	0,230	7,463
30 LES FERRES	1.381	0,086	1,182	0,086	1,182
31 LES MUJOLS	1.458	0,341	4,967	0,405	5,904
32 PIERREFEU	2.226	0,157	3,495	0,149	3,311
33 REVEST-LES-ROCHES	871	0,216	1,882	0,207	1,803
34 ROQUESTERON	635	0,092	0,584	0,092	0,582
35 ROQUESTERON-GRASSE	2.414	0,187	4,517	0,187	4,517
36 SAINT-ANTONIN	638	0,518	3,309	0,518	3,309
37 SAINT-AUBAN	4.274	0,448	19,137	0,432	18,474
38 SAINT-CEZAIRE-SUR-SIAGNE	3.011	0,156	4,711	0,153	4,621
39 SAINT-JEANNET	1.468	0,106	1,560	0,130	1,906
40 SAINT-VALLIER-DE-THIEY	5.229	0,194	10,129	0,183	9,586
41 SALLAGRIFFON	959	0,231	2,217	0,282	2,700
42 SERANON	2.332	0,251	5,852	0,245	5,717
43 SIGALE	561	0,150	0,840	0,150	0,840
44 SPERACEDES	359	0,045	0,163	0,089	0,318
45 TOUDON	1.849	0,252	4,654	0,273	5,047
46 TOURETTE-DU-CHATEAU	966	0,229	2,212	0,245	2,367
47 TOURETTES-SUR-LOUP	2.938	0,071	2,082	0,074	2,175
48 VALDEROURE	2.525	0,409	10,325	0,409	10,325
49 VENCE	3.942	0,114	4,494	0,108	4,268

Nous avons ainsi un indice  $K_a$  du PNRPA qui est passé de 216  $hKm^3$  en 1990 à 206  $hKm^3$  en 2006, soit une perte globale de 4,67 % pour la seule diversité structurale, avec toutes les incidences que cela suppose sur l'usage des sols, le développement durable, etc.

### 3.1.5.2 Corrélations diversité structurale / exergie

Notre sixième commentaire du tableau 7 (paragraphe 2.5.2.1.) insistait sur le fait que, si directionnalité de l'évolution, intensification et accumulation énergétique il y a, celles-ci sont le résultat des fonctions « redox », de réduction et d'oxydation des organismes vivants, notamment les autotrophes, qui combinent ces fonctions dans leur cytoplasme cellulaire.

Cette fonction étant notamment illustrée par les formules (37) et (38), où l'exergie  $pV$  apparaît comme la somme de  $G_B + TS$ .

La distance à l'équilibre constatable serait ainsi le résultat conjoint d'une *directionnalité de réduction* et d'une *directionnalité d'oxydation*, au bout d'un cycle alternatif combinant contraction et expansion, expiration et inspiration (respiration) des organismes, tendant soit à réduire la matière organique, soit à l'oxyder, pour au final maximaliser « conjointement » la distance à l'équilibre thermodynamique.

Ce qui reflète bien les fonctions fondamentales des organismes vivants, depuis l'endosymbiose, et peut se constater d'un seul regard dans une forêt quelconque.

Il y a d'abord la diversification structurale de l'écosystème, opérée grâce à l'intégration fonctionnelle (redox) des eucaryotes autotrophes (endosymbiose), et leur fonction primaire de réduction, générant les volumes primaires spécifiques de bois dur des troncs verticaux et des branches horizontales, dont la densité massique est une résultante directe de la directionnalité de réduction, assimilable à  $dp$  (38).

Dans le cycle annuel de la végétation, cette densification se constate particulièrement en automne, quand les arbres et plantes à feuillage caduc perdent leurs feuilles, stoppent leur photosynthèse, limitent leur consommation d'eau puis réduisent leur glucose en surplus pour le stocker dans leurs tissus sous forme d'amidon.

Puis il y a la diversification fonctionnelle de l'écosystème, développée grâce à l'oxydation du carbone réduit par les autotrophes.

Oxydation réalisée d'abord par la fonction secondaire des autotrophes dans leur phase de respiration. Au réveil de la végétation, les plantes oxydent en glucose leur stock d'amidon hivernal pour développer leurs nouvelles pousses et leur feuillage avant même que puisse démarrer la photosynthèse. Cette oxydation de l'amidon et du glucose permet la production de nouvelles molécules, qui, de la floraison à la fructification, intensifieront fortement l'exergie biochimique originellement réduite, à l'exemple notable des différentes huiles naturelles, qui formeront dans nos calculs un canon de l'intensification maximale due à la directionnalité d'oxydation.

C'est la phase végétative où partout le volume et la structure primaires de l'écosystème aura pris des notes de diversification en formes de volumes secondaires et de couleurs illustrant pleinement la biodiversité.

Cette alternance réduction/oxydation deviendra fondamentale dans notre mesure de l'exergie biogéochimique, de la diversité biologique et de sa distance à l'équilibre thermodynamique.

Mais en l'état, nous chercherons d'abord à vérifier la pertinence de l'indice  $K_a$  quant à la directionnalité de réduction et son impact sur la densité massique.

## Niveau 1 : Indice Ka et directionnalité de réduction dans l'Ecosphère

Les tableaux 4, 5 et 7 nous montraient les équations stœchiométriques illustrant les fonctions primaires de réduction du CO<sub>2</sub> et de H<sub>2</sub>O en molécules de glucose par les autotrophes. Nous avons pu les établir sur la base des travaux sur l'exergie, de Szargut, Valero et autres (2005) et de Valero (2008).

Sur cette même base, nous avons établi les équations stœchiométriques de réduction pour quelques molécules organiques issues du métabolisme redox des eucaryotes autotrophes : Glucose, Amidon, Cellulose, Lignine (1 et 2) et Margaro-oléine.

Nous avons retenu ces molécules pour leur caractère significatif des différentes phases de montée en pression de la diversité biologique, des directionnalités spécifiques de réduction et d'oxydation<sup>171</sup>, que nous aborderons ultérieurement plus en profondeur.

Quand les équations moléculaires n'existaient pas dans la littérature disponible, nous avons développé un petit modèle de programmation linéaire (fonction solveur d'Excel) qui nous a permis de trouver les inconnues propres aux différents équilibres.

Ces équations nous ont permis d'obtenir les masses précises des composants élémentaires de ces différentes molécules, et surtout leur contenu en exergie et énergie libre, le tout pour un kg de ces molécules.

Puis de calculer leur volume interne V, constituante de pV (tableau 7), afin d'obtenir leur densité massique (1/V), l'expression massique de leur énergie interne. Leur pression interne en MJ.m<sup>-3</sup>, que nous concevons dans ce travail comme une *fonction centrale* de la diversité biologique et de la direction de l'évolution, étant égale à pV \* 1/V.

Ce qui nous donne le tableau suivant :

Tableau 12 (figure 40) : Equations stœchiométriques de quelques molécules significatives des autotrophes

Pour 1 kg de → Equations stœchiométriques	Glucose			Amidon/Cellulose			Lignine 1*			Lignine 2**			Huile d'olive***		
	6CO <sub>2</sub> + 6H <sub>2</sub> O + G = C <sub>6</sub> H <sub>12</sub> O <sub>6</sub> + 6O <sub>2</sub>			6CO <sub>2</sub> + 5H <sub>2</sub> O + G = C <sub>6</sub> H <sub>10</sub> O <sub>5</sub> + 6O <sub>2</sub>			32CO <sub>2</sub> + 22H <sub>2</sub> O + G = 2C <sub>16</sub> H <sub>22</sub> O <sub>8</sub> + 35O <sub>2</sub>			10CO <sub>2</sub> + 6H <sub>2</sub> O + G = C <sub>10</sub> H <sub>12</sub> O <sub>4</sub> + 11O <sub>2</sub>			26,28 CO <sub>2</sub> + 24,22 H <sub>2</sub> O + G = 0,52 C <sub>51</sub> H <sub>94</sub> O <sub>6</sub> + 36,80 O <sub>2</sub>		
	Masse	Exergie massique (pV)	Densité massique (1/V)	Masse	Exergie massique (pV)	Densité massique (1/V)	Masse	Exergie massique (pV)	Densité massique (1/V)	Masse	Exergie massique (pV)	Densité massique (1/V)	Masse	Exergie massique (pV)	Densité massique (1/V)
© R.Loiret 2014	g.kg <sup>-1</sup>	MJ.kg <sup>-1</sup>	kg.m <sup>3</sup> <sup>-1</sup>	g.kg <sup>-1</sup>	MJ.kg <sup>-1</sup>	kg.m <sup>3</sup> <sup>-1</sup>	g.kg <sup>-1</sup>	MJ.kg <sup>-1</sup>	kg.m <sup>3</sup> <sup>-1</sup>	g.kg <sup>-1</sup>	MJ.kg <sup>-1</sup>	kg.m <sup>3</sup> <sup>-1</sup>	g.kg <sup>-1</sup>	MJ.kg <sup>-1</sup>	kg.m <sup>3</sup> <sup>-1</sup>
<b>Entrées</b>															
CO <sub>2</sub>	1466	0,66	1,27	1629	0,74	1,14	2057	0,93	0,90	2243	1,01	0,83	2794	1,26	0,67
H <sub>2</sub> O	600	1,51	2,04	556	1,40	2,21	579	1,46	2,12	551	1,38	2,22	1054	2,65	1,16
<b>Energie libre de Gibbs</b>	<b>19,55</b>			<b>20,53</b>			<b>24,63</b>			<b>26,00</b>			<b>36,32</b>		
CO <sub>2</sub> + H <sub>2</sub> O + G	2066	21,72	3,31	2184	22,67	3,35	2636	27,01	3,02	2794	28,39	3,05	3848	40,23	1,82
<b>Sorties</b>															
C	400	13,66	668,09	444	15,18	680,24	561	19,17	774,93	612	20,91	807,95	763	26,05	979,76
H <sub>2</sub>	67	7,86	1,34	62	7,28	1,45	65	7,59	1,39	62	7,22	1,46	118	13,81	0,76
O	533	0,07	2,68	493	0,06	2,89	374	0,05	3,82	326	0,04	4,38	120	0,01	11,95
CH <sub>2</sub> O	1000	21,59	672,10	1000	22,52	684,58	1000	26,81	780,13	1000	28,17	813,78	1000	39,88	992,47
O <sub>2</sub>	1066	0,13	2,68	1184	0,15	2,41	1636	0,20	1,75	1794	0,22	1,59	2848	0,35	1,00
CH <sub>2</sub> O + O <sub>2</sub>	2066	21,72	674,78	2184	22,67	686,99	2636	27,01	781,88	2794	28,39	815,37	3848	40,23	993,47
<b>Ind. Ka (masses)</b>	<b>0,162</b>			<b>0,183</b>			<b>0,268</b>			<b>0,299</b>			<b>0,452</b>		

\* Coniférine

\*\* Aldéhyde hydroxiconiferylrique

\*\*\* Margaro oléine

<sup>171</sup> Après une étude du contenu en CHL (Cellulose, Hémicellulose, Lignine) et GPL (Glucides, Lipides, Protides) d'un panel couvrant l'ensemble des matières organiques produites au sein de l'Ecosphère et de sa chaîne trophique (en se fondant notamment sur diverses publications des offices forestiers français et canadiens, et sur la base de données « Cliqual », qui détaille le contenu énergétique, y compris des protides et lipides, de plus de 1400 produits végétaux et animaux issus de l'agriculture, de l'élevage, de la chasse et de la pêche).

### Commentaires :

Nous pouvons remarquer dans une lecture horizontale de ce tableau, que, d'une molécule à l'autre, l'exergie et l'énergie libre, égales pour l'amidon et la cellulose, sont sinon croissantes.

Mais nous pouvons faire aussi d'autres constats d'un caractère beaucoup plus crucial concernant l'efficacité des organismes autotrophes produisant ces molécules.

En effet, dans une lecture verticale, à masse et énergie constantes, plus leur densité massique est importante, plus l'absorption de CO<sub>2</sub> et la production d'O<sub>2</sub> est efficace, et ceci, plus que proportionnellement.

Ainsi, pour une densité massique de 674 kg.m<sup>-3</sup>, le glucose absorbe 1,466 kg de CO<sub>2</sub> et rejette 1,066 kg d'O<sub>2</sub>. Ceci quand la margaro-oléine, pour une densité massique de 993 kg.m<sup>-3</sup>, absorbe 2,794 kg de CO<sub>2</sub> et rejette 3,848 kg d'O<sub>2</sub>.

Pour une densité interne augmentée de 1,47 fois, la margaro-oléine a ainsi augmentée son efficacité « de lutte contre l'effet de serre » (façon de parler) de 1,9 fois concernant le CO<sub>2</sub> et de 3,6 fois concernant l'O<sub>2</sub>.

Ce qui illustre d'une manière on ne peut plus claire le second principe biogéochimique de Vernadsky, selon lequel, entre la Biosphère et l'Ecosphère, les organismes vivants, par leur biodiversité, se sont « débrouillés », grâce à leurs fonctions redox incorporées, pour intensifier considérablement l'efficacité originelle des archées et bactéries primitives, dont nous pourrions rapprocher l'efficacité originelle de celle du glucose.

Ainsi, si la Biosphère originelle des archées et bactéries primitives a enclenché un processus de production d'atmosphère vivable et d'eau liquide qui a permis une première stabilisation de la distance à l'équilibre de ses compartiments ; et les organismes vivants qui ont suivi, dans l'Ecosphère, des eucaryotes monocellulaires aux eucaryotes multicellulaires, n'ont cessé depuis d'amplifier « plus que proportionnellement » cette distance à l'équilibre, jusqu'à la stabiliser dans l'état que nous connaissions au début du XXe siècle.

Mais il y a mieux que cela. Comme nous le verrons plus loin, à la sortie des cycles biotiques (BMC) des biogéocénoses de l'Ecosphère, les couches profondes de la Biosphère reprennent à leur compte cette intensification de la « réduction » pour stabiliser définitivement le carbone organique, sous des formes moléculaires telles que le graphite, le diamant, et aussi le Buckminsterfullerène (voir plus loin).

Le processus d'intensification énergétique ne va donc pas seulement de la Biosphère vers l'Ecosphère, mais se complète par un retour à la Biosphère.

Et c'est dans les couches les plus profondes de cette dernière que ses forces de pression viendront compléter celles des organismes vivants de l'Ecosphère pour produire toutes les formes d'énergie et de carbone fossile que nous connaissons et ainsi, sauf l'économie, définitivement stabiliser la distance à l'équilibre planétaire.

Il existe ainsi une relation extrêmement puissante entre le diamant (comme image de la rareté et de la stabilisation maximale), et le dioxygène, qu'il serait intéressant de calculer. A savoir, combien de kg d'O<sub>2</sub>, un kg de diamant a définitivement stabilisés au long des quelques 2 ou 3 milliards d'années qui furent nécessaires pour le produire ?

Pour revenir à notre tableau, c'est en partant de ce dernier que nous avons ensuite calculé l'indice  $K_a$  de « diversité structurale » des différentes molécules, en le basant sur la

masse spécifique (à proportion constante pour une molécule donnée) de leurs composants.

À l'exemple suivant du glucose :

Tableau 13 (figure 41) : Calcul de l'indice  $K_a$  du glucose (masse des composants)

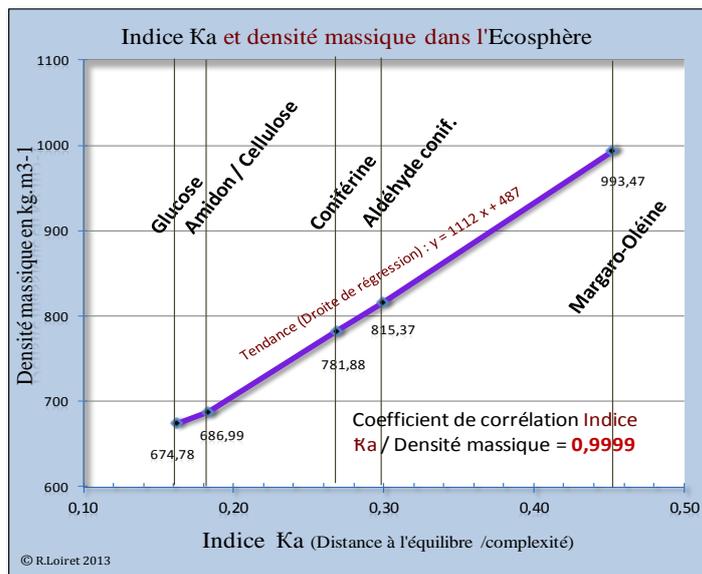
Indice $K_a$ du Glucose	
$K_a = D_2/D_2\max$	<b>0,162</b>
$D_2\max = 1 - 1/n$	0,750
$D_2 = D_1 - 1/n$	0,121
$1/n$	0,250
$D_1 = \Sigma(pi)^2$	<b>0,371</b>
$\Sigma$ grammes	
<b>2.066</b>	
400	0,037
67	0,001
533	0,067
1.066	0,266

Ce qui nous a permis de calculer le coefficient de corrélation entre les pentes d'évolution de l'indice  $K_a$  et de la densité massique (fonction de la pression interne) de ces différentes molécules, puis d'établir un graphe de tendance.

Tableau 14 (figure 42) : Corrélation indice  $K_a$  et densité massique moléculaire

Molécules	Indice $K_a$ (masses)	Densité massique Kg.m3-1
Glucose	<b>0,162</b>	674,78
Amidon/Cellulose	<b>0,183</b>	686,99
Coniferine	<b>0,268</b>	781,88
Aldehyde Conif.	<b>0,299</b>	815,37
Margaro Oleine	<b>0,452</b>	993,47
<b>Etalon</b>	<b>1,000</b>	1599,30
<b>Coefficient r de corrélation</b>		<b>0,9999</b>

Figure 43 : Graphe de tendance de l'indice  $K_a$  et de la densité moléculaire dans l'Ecosphère



Ainsi le parallélisme des pentes d'évolution de la densité massique et de l'indice  $K_a$  de diversité différentielle  $\beta$  devient presque absolu, ce qui aurait vocation à plus que vérifier l'aromorphose et les relations intimes, entre la diversité biologique, le niveau d'information-structure et l'intensification énergétique (direction de l'évolution) établies par Lotka et Vernadsky dès 1922 !

Cette corrélation nous donne une tendance (droite de régression) de formule  $y = 1112 x + 487$ , qui étalonne la densité absolue de réduction (valeur 1 de l'indice) à  $1.599 \text{ kg.m}^3$ , c'est à dire la densité maximale qu'une même masse moléculaire carbonée, partant du glucose pur, serait susceptible d'atteindre.

Or une nouvelle molécule de carbone organique en  $C_{60}$ , le « Buckminsterfullerène » a été découverte en 1985 par Harold Kroto, Robert Curl et Richard Smalley (prix Nobel de chimie 1996).

Cette molécule représente la forme la plus pure et réduite, avant le diamant<sup>172</sup>, que le carbone puisse atteindre (où ?), sa forme est celle d'un ballon de football.

Figure 44 : Molécule de Buckminsterfullerène ( $C_{60}$ )



Source : Wikipédia

Sa densité massique serait de  $1.650$  à  $1.729 \text{ kg.m}^3$ . Cette molécule aurait ainsi vocation à former l'étalon général de mesure de notre indice.

Mais sa densité est cependant très supérieure à la densité maximale que le carbone organique peut atteindre à partir du glucose, par simple réduction, dans l'Ecosphère.

Cette réduction maximale du carbone organique nous est donnée par 3 types de bois anhydre (totalement sans eau, non « séchés à l'air »), deux arbres du Surinam, le Spikri oedoe et le Rambutan (Doat, 1977) et un arbre bien connu de nos contrées, le Méléze. Avec l'exergie et la densité massique suivante :

Tableau 15 (figure 45) : Exergie et densité maximale des bois dans l'Ecosphère

	Exergie massique	Densité massique
Type de bois	MJ.kg-1	kg.m3-1
Rambutan (Surinam)	19,96	1.080
Spikri oedoe (Surinam)	20,32	1.099
Méléze (Europe ...)	20,75	1.123

<sup>172</sup> Des recherches en cours montreraient qu'après traitement, cette molécule serait plus dure que le diamant.

Source : Doat, 1977, et divers

La densité de  $1.120 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$  du Mélèze représenterait ainsi l'étalon de l'intensification énergétique maximale de la directionnalité de réduction dans l'Ecosphère, à partir de quoi les Deadlock sortiraient des cycles biotiques (BMC) pour entrer par subduction dans les couches profondes de la Biosphère, où ses forces de pression internes continueraient le travail de réduction du carbone jusqu'à atteindre le maximum du Buckminsterfullerène.

Sachant que la question du diamant, qui atteint  $3.512 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$  est autre car sa zone de formation et de stabilité est bien plus profonde dans le manteau terrestre. Elle commence juste au sortir de la Biosphère (lithosphère) vers 100 km de profondeur pour descendre jusqu'à 700 km et plus encore (Martin, 2009).

Quand le carbone organique entre dans la Biosphère profonde, il subit, entre les Deadlock et le buckminsterfullerène, différentes phases de transformation au cours desquelles il va notamment constituer les différentes formes de combustibles fossiles que nous connaissons, avec des densités croissant au prorata.

Ce qui caractériserait une directionnalité de réduction propre à la Biosphère profonde complétant la directionnalité de l'évolution des biogéocénoses.

L'indice  $\mathbb{K}a$  peut-il la faire apparaître ? Tentons de le vérifier.

## Niveau 2 : Indice $\mathbb{K}a$ et directionnalité de réduction dans la Biosphère

Pour ce faire, ce ne sont plus les molécules organiques que nous utiliserons, mais les tissus carbonés en voie de fossilisation issus des autotrophes et hétérotrophes.

Si nous caractérisions ces tissus organiques par leurs contenus très variés en molécules et cellules de différentes sortes (avec un niveau d'information de plus en plus complexe à caractériser), nous aurions certes beaucoup de difficulté à établir une règle uniforme et continue de vérification, mais si nous ne retenons, comme le font les énergéticiens et certains agronomes, que leurs contenus principaux en carbone, hydrogène et oxygène, cette vérification sera beaucoup plus aisée.

Mais pour vérifier ici la pertinence de l'indice  $\mathbb{K}a$ , nous n'avons pas utilisé, comme dans le graphe précédent, la densité massique, trop variable en fonction des composés et de leur origine géographique.

Nous avons retenu l'exergie massique, plus constante, de plusieurs tissus carbonés organiques dans l'ordre croissant de leur niveau d'exergie ; ceci quoique la corrélation avec la densité massique eut été plus élevée, comme ce fut le cas avec les molécules organiques.

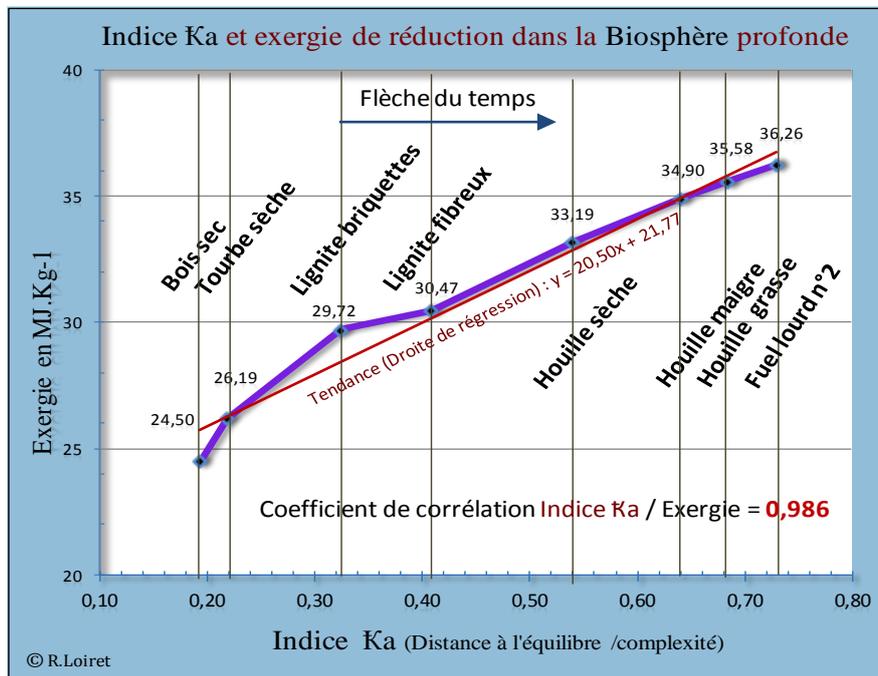
Il n'y eut pas lieu ici de calculer les équations stœchiométriques, mais de calculer l'exergie massique et l'indice  $\mathbb{K}a$  de ces tissus en se basant sur leurs masses internes de carbone, hydrogène et oxygène.

Ce qui nous donne les résultats suivants :

Tableau 16 (figure 46) : Corrélation indice Ka/exergie de quelques composés de carbone organique

Carbone organique	Indice Ka (masses)	Exergie (MJ.kg-1)
Bois sec max	0,192	24,50
Tourbe sèche	0,218	26,19
Lignite briquettes	0,325	29,72
Lignite fibreux	0,408	30,47
Houille sèche	0,540	33,19
Houille maigre	0,640	34,90
Houille grasse	0,684	35,58
Fuel lourd n°2	0,729	36,26
Coefficient r de corrélation		0,98645

Figure 47 : Graphe de tendance de l'exergie et de l'indice Ka tissulaire dans la Biosphère profonde



Concernant le parallélisme des pentes d'évolution de l'exergie et de l'indice Ka des tissus carbonés (dans leur devenir progressif de combustibles fossiles), nous faisons ainsi pour la Biosphère profonde à peu de choses près le même constat que pour l'Ecosphère.

Le changement d'échelle entre molécules et tissus cellulaires n'a donc eu aucune incidence, ce qui nous montre bien que la directionnalité de réduction et l'éloignement de l'équilibre qui en résulte est un « processus planétaire » qui traverse toutes les échelles du vivant.

Et toutes les couches de la Biosphère, quand nous constatons que la directionnalité de réduction de la Biosphère profonde prend le relais de l'Ecosphère, et de sa direction de l'évolution en continuant à réduire les tissus carbonés (bois, tourbe, ...), là où l'Ecosphère les avait laissés.

### Niveau 3 : Indice Ka et distance à l'équilibre de la Biosphère

L'indice Ka nous permettrait ainsi de vérifier une directionnalité globale qui, depuis les biogéocénoses jusqu'à la Biosphère en entier, participe d'un processus unifié.

Quoique les échelles de temps dans la Biosphère et l'Ecosphère soient radicalement différentes, cette continuité du processus de réduction est étonnante et peut susciter quelques nouvelles interrogations quant à la direction de l'évolution.

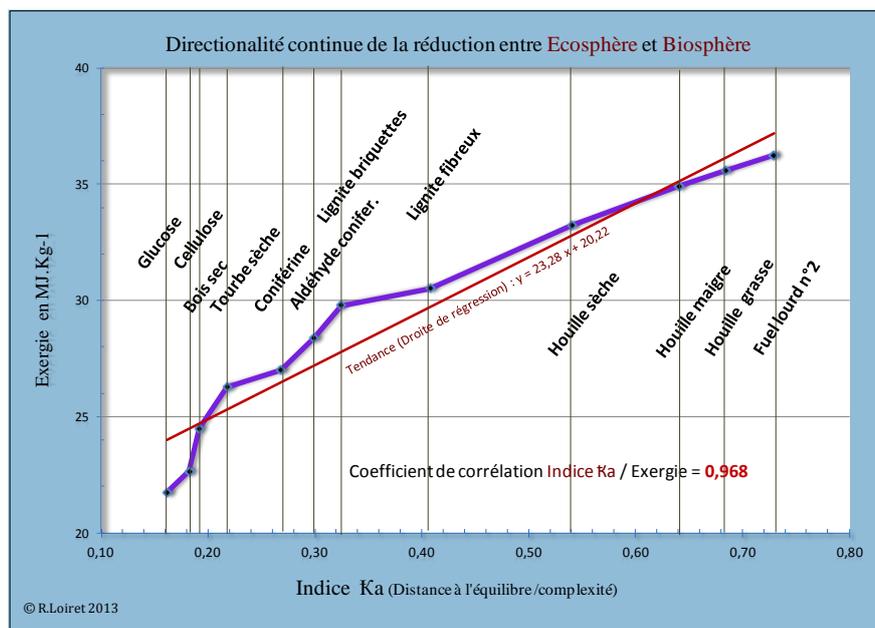
Tout se passe comme si ce processus planétaire avait « de la suite dans les idées » !

Quand les cycles biotiques (BMC) selon Gubanov et Degermendzhy (2008) nous montraient le principe redox d'accumulation énergétique au sein des biogéocénoses, ils mettaient dans le même temps le doigt sur un phénomène d'une dimension beaucoup plus large, le principe d'accumulation énergétique planétaire.

Entamant leur subduction dans les couches profondes de la Biosphère au sortir de l'Ecosphère, les Deadlock rejoignent le cours du temps des processus primitifs de formation de la Biosphère qui ont permis l'apparition du vivant sur notre planète, et avec eux les stocks de carbone déjà fossilisés, pour amplifier un processus de subduction global commencé il y a plus de 3 milliards d'années.

A l'inverse des émissions CO<sub>2</sub>, dont la production locale la plus élémentaire s'agrège aussitôt à la dimension globale de l'effet de serre, la production locale de distance à l'équilibre la plus élémentaire des organismes s'agrège ainsi à un processus global cohérent où partout la partie accompagne la formation du tout dans une direction finale unique : La stabilisation de la distance à l'équilibre planétaire.

Figure 48 : Une évolution planétaire dirigée de la fossilisation du carbone organique



Cette directionnalité continue de réduction depuis les biogéocénoses jusqu'aux grandes profondeurs de la lithosphère confirme en les amplifiant les concepts de Lotka et les deux principes de Vernadsky.

Tout se passe « comme si » la directionnalité globale d'une *aromorphose planétaire* avait pour « objectif » de stocker le carbone organique de la manière la plus « irréversible » (stable) possible, sachant qu'avec le carbone stocké, ce sont les quantités de CO<sub>2</sub> et d'oxygène atmosphérique, ainsi que la phase liquide de l'eau, qui sont stabilisées dans des bornes très précises de viabilité du vivant.

Et avec elles la « distance à l'équilibre globale » de la Biosphère.

Ceci comme le vérifie notamment le diamant d'origine organique, stocké depuis sa zone de stabilité vers 100 km de profondeur, jusqu'à 700 km (Martin, 2009).

Ce qui pourrait nous laisser supposer l'existence de stocks considérables de carbone de très haute densité (graphite, diamant, ...) dans ces couches profondes.

Il existerait dans tous les cas une relation stœchiométrique très précise entre l'oxygène libre planétaire et les stocks profonds de carbone organique fossilisés, qui participerait à la production d'une *distance à l'équilibre thermodynamique* de la planète ; ce dont nous envisagerons le concept général et la vérification au dernier chapitre de notre thèse.

Cette relation suffirait en soi à nous montrer l'extrême et fatale dangerosité de la transformation de ces stocks fossiles en CO<sub>2</sub> et tout autre polluant chimique réduisant cette distance à l'équilibre.

Nous passons là de la seule dimension du réchauffement climatique, à la dimension d'une destruction (déstructuration) globale de la Biosphère et de ses grands équilibres, établis depuis des milliards d'années.

Au delà du changement climatique, et quels que soient les arguments, nous serions bien en train de « tuer » notre planète !

Mais faut-il encore pouvoir le montrer et le démontrer.

## 3.2 Clarifications : Fonctions redox de la Biosphère et de l'Ecosphère

Il va nous falloir maintenant caractériser les deux composantes, additives, de la  $D_{ET}$ , soit les distances à l'équilibre de réduction ( $D_{ER}$ ) et d'oxydation ( $D_{EO}$ ).

Nous les introduirons en donnant quelques précisions sur les fonctions redox respectives de la Biosphère et de l'Ecosphère, déjà entrevues au chapitre II (paragraphe 2.1.6.5) avec les principes fondamentaux de la Biosphère et de l'Ecosphère.

Il s'agit maintenant d'approfondir ces fonctions, tant que cela s'avérera nécessaire à nos démonstrations, en ce qu'elles nous permettront de mieux saisir les différences que nous avançons entre la distance à l'équilibre de réduction ( $D_{ER}$ ), produit de la diversité structurale, et la distance à l'équilibre d'oxydation ( $D_{EO}$ ), produit de la diversité fonctionnelle.

### 3.2.1 Caractérisation de la Biosphère, le « domaine » du vivant

On se référera pour faciliter si besoin la lecture à notre schéma de la figure 13.

La Biosphère aurait ainsi commencé son expansion sur la croûte terrestre primitive avec l'apparition, au début de l'Archéen (autour de -3,7 milliards d'années), des premières formes de vie : les archées et les bactéries primitives (ou archéobactéries). Couvrant aujourd'hui toute la surface terrestre, son étendue verticale (y compris son ère d'influence) irait de la couche d'ozone jusqu'au champ de stabilité du diamant (100% de carbone) d'origine organique, à 100km de profondeur.

Il nous est difficile de concevoir que notre atmosphère, l'eau de mer liquide, toutes les roches métamorphiques, les terres agricoles, etc., c'est à dire l'ensemble de notre milieu physique actuel, aient une origine « temporelle », et soient le produit d'un « processus de création » d'origine biogéochimique.

Cela fut pourtant le cas ; lors de son accréation primitive, au début de l'Hadéen, il y a 4,6 milliards d'années, l'ensemble de la surface terrestre pouvait se présenter comme tel, constitué d'une masse parfaitement uniforme de magma en train de se solidifier.

Figure 49 : La surface terrestre magmatique des origines



Source : <http://www.cosmographica.com/gallery>

Pour Vernadsky, la Biosphère et ses compartiments ont été ensuite directement produits (créés), à partir de l'Archéen, par la « matière vivante », qu'il faut voir comme un ensemble de tapis microbiens qui se sont alors répandus sur toute la surface de la terre.

Lynn Margulis (1986) nous décrit le caractère homogène de ces tapis de matière vivante (bio-film), en même temps que les fonctions différenciées qu'ils exerçaient dans un milieu primitif terriblement agressif, qui n'était alors pas protégé des rayons ultra violets par une couche d'ozone qui n'apparaîtra que bien plus tard.

Dès le début de l'époque où la Terre fut recouverte d'eau, des colonies de différents types de microbes se sont groupées en habitats coopératifs qui auraient été visibles comme des paquets d'écume gluante, des taches pourpre ou marron et d'étranges pâturages à plusieurs niveaux. Génération après génération, les bactéries des niveaux supérieurs mouraient de l'exposition aux radiations, mais leurs restes protégeaient les niveaux inférieurs qui amassaient du sable et des sédiments pour fabriquer une sorte de tapis vivant. Les tapis microbiens et les boues prédominaient dans les paysages aquatiques et plats de l'époque archéenne [Margulis, 1986:81].

Puis elle nous désigne par un nom spécifique, le « microcosme », le super ensemble que formèrent alors ces tapis bactériens (ou pellicules microbiennes, ou bio-films), et nous en précise les fonctions :

... la pellicule planétaire, avec son armée de cellules, perdure depuis plus de 3 milliards d'années. Son fonctionnement passé, présent et futur, c'est le **microcosme**, des milliers de milliards de microbes en communication et en évolution. Le monde visible constitue une fraction tardive, hyperdéveloppée, du microcosme. Il fonctionne grâce aux connections perfectionnées qu'il maintient avec les activités du microcosme. Des chercheurs pensent que les microbes ont eux-mêmes maintenu la température moyenne de la Terre primitive à un degré favorable à la vie, bien que le Soleil, estiment les astronomes, ait été beaucoup moins chaud qu'aujourd'hui. Durant l'époque archéenne, de « stupides » microbes ont modifié sans arrêt la composition chimique de l'atmosphère de sorte qu'elle ne fasse pas obstacle à la vie [Ibid.:64].

### 3.2.1.1 Fonctions redox de la matière vivante au sein de la Biosphère

Comme nous l'avons déjà exprimé, les spécialistes en *biogéochimie* américains, notamment de la NASA, ont repris, originellement via Hutchinson, et depuis 1998 (publication anglaise de *La Biosphère*) plus directement auprès de Vernadsky, une grande majorité de ses principes concernant l'apparition de la Biosphère ; et ils ont depuis analysé en profondeur les processus de fonctionnement du microcosme primitif, tels qu'on en trouve encore les témoins, comme dans les tapis microbiens des milieux hypersalins à l'exemple de la Mer morte.

Nous pouvons constater avec schéma de la figure 15, résumant les processus de transformation chimique d'un tapis microbien, que le microcosme assume globalement, à partir des multiples espèces de bactéries rassemblées en son tout homogène, une double fonction biogéochimique : une fonction « autotrophe », principalement caractérisée par la réduction du CO<sub>2</sub> et une fonction « hétérotrophe », principalement caractérisée par l'oxydation du carbone des corps bactériens morts ; ceci comme nous en avons représenté les processus simplifiés dans nos tableaux stœchiométriques.

Ramené à l'échelle planétaire, c'est en produisant ainsi des milliards de milliards de réactions élémentaires que le microcosme, au long de son expansion de près de deux milliards d'années, aurait complètement nettoyé/détoxifié, en même temps que différencié, l'« atmo-hydrosphère » anoxique primitive pour produire l'atmosphère et l'hydrosphère actuelles.

Et c'est ainsi notamment qu'il aurait régulé les quantités atmosphériques d'O<sub>2</sub> en excès, en les diffusant dans l'eau de mer et les milieux terrestres profonds (puits d'O<sub>2</sub>); ceci tout en stabilisant l'effet de serre et la température moyenne de l'atmosphère (à 15°C en moyenne), ce qui par contre coup a stabilisé la phase liquide de l'eau de mer; processus globaux sans

lesquels la surface terrestre serait aujourd'hui complètement gelée à une température moyenne d'environ -83 °C.

Et c'est cette production d'O<sub>2</sub>, sa diffusion dans l'eau de mer et dans la lithosphère qui aurait oxydé progressivement au long de ces deux milliards d'années, tant le carbone bactérien que les métaux du milieu primitif de la lithosphère, oxydation suivie d'une concentration dans les couches profondes sous marines et terrestres (subduction des gisements de carbone fossile comme les hydrates de méthane, gisements métalliques, ...); ceci en même temps que la montée en puissance progressive du cycle de l'eau lessivait les sels de la croûte primitive pour les concentrer dans l'eau de mer ou dans les couches géologiques profondes.

Toutes fonctions originelles des cycles biogéochimiques de la matière vivante de la Biosphère, qu'un biologiste américain, disciple de Hutchinson/Vernadsky et membre de l'Académie des sciences des USA, Paul Falkowski, a résumées avec ses coauteurs dans le schéma de la figure 16 (paragraphe 2.1.6.5).

C'est la coordination de ces fonctions très multiples et complexes de réduction et d'oxydation d'un même « organisme global », serait-il constitué par quantité d'espèces différentes, que nous pourrions nommer « fonction redox de la matière vivante » (de la Biosphère)<sup>173</sup>; ceci quand les industries chimiques et métallurgiques connaissent très bien cette fonction, mais pour une production n'ayant pas grand chose à voir avec ces processus originaires du vivant.

### 3.2.1.2 La Biosphère et le premier principe biogéochimique

Comme le disait Vernadsky, la Biosphère est le « domaine » (habitable) de la matière vivante, homogène, non structurée, non « organisée », et comme pour tout organisme vivant, son habitat s'élargit au prorata de la croissance de ses habitants, s'emplit de leur respiration, et les imprègne en retour de son champ de « protection » thermodynamique, ...de son « atmosphère » !

Vernadsky revient à de nombreuses reprises sur cette extraordinaire force de croissance de la matière vivante quand elle ne trouve aucune contrainte sur son passage. La population bactérienne du microcosme aurait ainsi progressivement rempli la Biosphère des déchets « biogènes » de son métabolisme (les premières sources d'énergie fossile), tout en élargissant sa propre masse, et en concentrant sa « densité ».

La matière vivante, l'ensemble des organismes, se répand sur toute la surface terrestre de manière analogue à celle des gaz et produit une pression déterminée dans le milieu ambiant; elle évite les obstacles qui se trouvent sur le chemin de son mouvement ascendant ou s'en rend maîtresse et les recouvre. Avec le temps, la matière vivante revêt d'une enveloppe continue tout le globe terrestre et ne disparaît qu'à certains moments seuls, lorsqu'une force extérieure brise ou arrête dans son cours son mouvement, son étreinte. Ce mouvement est causé par la multiplication des organismes, savoir, par l'accroissement automatique du nombre de leurs individus. Il s'effectue d'habitude sans jamais s'interrompre, avec une intensité déterminée analogue à celle du rayon solaire tombant sur la face de la Terre. Il est certains que malgré l'extrême mutabilité de la vie, les phénomènes de reproduction, multiplication et croissance des organismes et de leurs ensembles (matières vivantes), c'est à dire le travail vital de la transformation de l'énergie solaire en énergie chimique terrestre, sont soumis à des lois mathématiques immuables [Vernadsky, 1929:80-81].

<sup>173</sup> En France, les agronomes, notamment du CIRAD, commencent tout juste à s'y intéresser (Husson, 2012).

La matière vivante répond ainsi à un principe de croissance tout au long de laquelle elle produit toujours plus de gaz, en pression et volume ; principe a priori sans limites (premier principe biogéochimique) s'il n'était contraint. Un processus alternatif de « respiration » qui augmente la pression et le volume internes de la Biosphère, tout comme nous soufflons dans un ballon.

Nous avons tous connu aux alentours de Noël ces immenses structures gonflables en forme de châteaux ou de fusées, utilisées comme espaces de jeu pour les enfants. Nous pouvons les assimiler à autant de petites structures dissipatives imitant la grande, l'espace urbain, reliées à un compresseur maintenant leur pression à un niveau stable et continu.

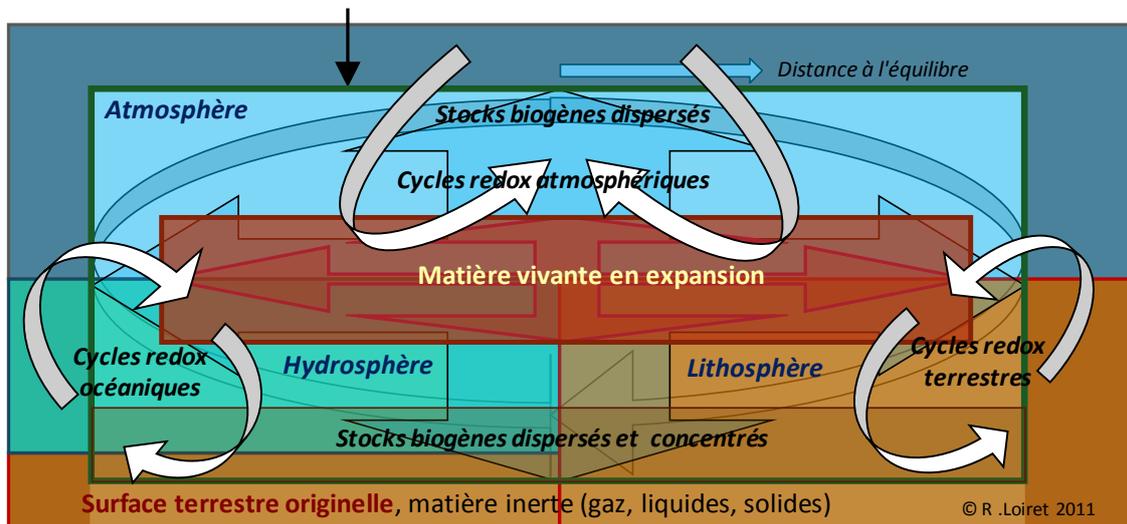
La Biosphère peut de la même manière être regardée dans son expansion comme une de ces structures gonflables, le côté réducteur de la matière vivante jouant dans ce cas le rôle du compresseur produisant au sens propre du gaz comprimé.

La matière vivante aurait ainsi « gonflé » l'atmosphère, pour ensuite le maintenir dans un état stationnaire d'équilibre entre des états différenciés. La Biosphère démontre ainsi l'existence de cycles négentropiques/entropiques de production qui ressemblent en bien de ses aspects à ces cycles thermodynamiques producteurs de travail (paragraphe 2.2.2.5.), et à beaucoup des moteurs de nos véhicules ; moteurs dans lesquels l'entropie négative aurait la fonction active, et l'entropie positive la fonction réactive (comme le retour nécessaire à l'équilibre du piston dans son cylindre après l'explosion de la chambre de combustion).

Entre la « pression de réduction » de la matière vivante en expansion, et le « volume d'oxydation » qui en résulte, se profile ainsi dans la Biosphère en expansion tout l'enjeu de la production alternative (comme le piston au travail) d'une masse négentropique de carbone en pression et d'un volume entropique de gaz en expansion.

Figure 50 : Représentation de la Biosphère en expansion, depuis l'Archéen

**Biosphère**, domaine du vivant en expansion de pression et volume ( $pV$ )



Le tout résultant dans une fonction redox, alternant pression négentropique et volume entropique, dont le produit final génèrera une « distance à l'équilibre » toujours plus importante.

Nous constatons ainsi l'existence d'une étonnante boucle vertueuse (cycles biogéochimiques) dans laquelle toutes les fonctions vitales de la Biosphère convergent

ensemble vers « **la manifestation la plus complète de la Biosphère** » (premier principe de Vernadsky).

### 3.2.2 De la Biosphère à l'Ecosphère

Nous inciterons notre lecteur à se référer aux schémas des figure 13 et 50 pour une meilleure représentation des relations potentielles Biosphère/Ecosphère que nous approfondissons dans le présent paragraphe.

#### 3.2.2.1 Note sur le rapport Biosphère/Ecosphère chez Vernadsky

Le terme « Ecosphère », prononcé pour la première fois par Lamont Cole (Cole, 1958), n'existe pas chez Vernadsky ; mais essentiellement le terme, car Vernadsky formule explicitement, tout au long de son œuvre, et notamment de *La Biosphère* (Vernadsky, 1929), les concepts fonctionnels d'une nouvelle sphère du vivant, qu'il nomme explicitement sa « maison », parfaitement distincte de la Biosphère, bien que située au sein d'elle-même (Loiret, 2012a).

De son temps, il ne pouvait la « nommer » du seul fait des méconnaissances concernant les bactéries primitives et archées (procaryotes), alors mal distinguées des eucaryotes unicellulaires primitifs (protistes,...), qui constituent par rapport aux premiers une frontière radicale de l'évolution du vivant ; ce qui veut dire que la frontière biologique, spatiale et temporelle séparant ces deux sphères n'était alors pas bien discernable.

Ceci faisant, quand le nouveau « métaconcept » d'Ecosphère croisera à partir de 1958 celui de Biosphère, très peu diffusé avant 1998 dans les pays de culture scientifique anglo-saxonne, cela engendrera jusqu'à nos jours, dans la communauté scientifique internationale, de grosses confusions et contresens quant aux rapports et relations de ces deux sphères, tantôt inversées, tantôt ignorées, etc.

Ces contresens brouillant considérablement notre propre horizon de recherche sur la biodiversité, nous avons alors entrepris de replacer explicitement, à l'exemple de Grinevald (2002) pour la Biosphère, le métaconcept d'Ecosphère en adéquation tant avec celui de Biosphère, qu'avec l'œuvre et les concepts biogéochimiques de Vernadsky (Loiret, 2012a).

#### 3.2.2.2 La frontière de l'endosymbiose

Lynn Margulis avant tout autre a explicitement caractérisé cette frontière, à l'échelle des organismes, ceci quand Sewertzoff nous en avait donné, avec l'aromorphose, le principe fonctionnel :

Mais les microbes ont eu un impact encore plus important. Ils ont modifié entièrement la surface de la Terre (...) Avant que les cyanobactéries se mettent à décomposer les molécules d'eau et à produire de l'oxygène, rien n'indiquait que la pellicule de vie de la Terre ne serait jamais plus qu'une discrète écume à sa surface (...) Vers le milieu du Protérozoïque, il y a environ 1,5 milliard d'années, l'essentiel de l'évolution biochimique était accomplie. La surface et l'atmosphère actuelles de la Terre étaient posées. La vie microbienne s'était insinuée dans l'air, le sol et l'eau, assurant, comme aujourd'hui, la circulation des gaz et des autres éléments à travers les fluides planétaires. A l'exception de quelques composés exotiques, les huiles essentielles et les hallucinogènes produits par certaines plantes à fleur, ou les venins les plus efficaces de quelques serpents, les microbes procaryotes étaient capables de fabriquer et décomposer toutes les molécules de la vie moderne (...) La production de nourriture et d'oxygène à partir de la lumière allait faire des microbes le fondement d'un cycle alimentaire planétaire qui s'étend jusqu'à aujourd'hui ; les animaux n'auraient jamais pu évoluer sans la nourriture fabriquée par photosynthèse et sans oxygène de l'air (...)

Durant cette longue période où le niveau de l'oxygène atmosphérique s'est élevé jusqu'à 21%, il y a quelques 2,2 milliards d'années, un nouveau type de cellule est apparu alors que l'oxygène constituait seulement quelques pour cent de l'atmosphère (...) La dynamo créée par les cyanobactéries était un préalable pour la nouvelle unité du vivant : la cellule à noyau, composant fondamental des plantes, des animaux, des protistes et des champignons. Chez les eucaryotes, les gènes sont enveloppés dans un noyau et les processus cellulaires internes savamment orchestrés métabolisent l'oxygène pour le reste de la cellule. Le cytoplasme qui entoure le noyau contient notamment des structures spéciales, les mitochondries (...) L'organisation de la cellule eucaryote diffère tellement de celle de la cellule procaryote ou bactérienne que les deux types de cellules représentent la séparation la plus radicale entre les formes de vie connues (...) La différence entre les cellules bactériennes, sans noyau, et les cellules à noyau est bien plus considérable que celle qui sépare les plantes des animaux (...) La transition biologique entre les bactéries et les cellules à noyau, c'est-à-dire entre les procaryotes et les eucaryotes, est si soudaine qu'elle ne peut être expliquée par des changements graduels étalés dans le temps. La séparation entre les bactéries et les nouvelles cellules marque, en fait, la division la plus infranchissable dans toute la biologie [Margulis et Sagan, 1986:117-121].

C'est ainsi que Lynn Margulis introduisait sa théorie de l'endosymbiose<sup>174</sup>.

Sur le strict plan biologique, cette théorie explique un processus qui marque une rupture fondamentale de l'évolution du vivant sur notre planète ; c'est le processus par lequel la cellule à noyau des eucaryotes, et notamment celle des autotrophes (protistes, plantes,...), est apparue par symbiose progressive de procaryotes autotrophes et hétérotrophes (bactéries réductrices et oxydantes) dans le plasma d'un procaryote ancestral ; et dont on retrouve le modèle fonctionnel réuni au complet dans les chloroplastes et mitochondries du cytoplasme de la cellule eucaryote autotrophe ; dont le protiste du genre *Englena* est aujourd'hui considéré comme un « prototype » (voir plus loin sa représentation).

Lorsque la Biosphère a atteint, grâce au microcosme bactérien, son stade de croissance optimal, entre -1,7 et -1,4 milliard d'années, sont ainsi apparus les protistes ; des eucaryotes unicellulaires, capables de réguler le différentiel de composition O<sup>2</sup>/CO<sup>2</sup> de l'atmosphère, et de se reproduire, alternativement, par mitose (dédoubléement cellulaire des bactéries) et par méiose (la moitié seulement du matériel génétique de chaque parent passe à la génération suivante).

Là où les bactéries évoluaient antérieurement par la lente incorporation anthropophage du matériel génétique d'espèces différentes, ces nouvelles cellules devenaient capables de s'adapter beaucoup plus rapidement aux conditions changeantes de la Biosphère, avec un ADN qui, grâce à la combinaison des patrimoines héréditaires de la méiose, deviendra jusqu'à 1000 fois plus développé que celui des bactéries primitives.

D'où l'intensification de la direction de l'évolution, et *le second principe biogéochimique* de Vernadsky, dont la seule existence affirme le concept d'Ecosphère, même si son nom ne pouvait encore être prononcé.

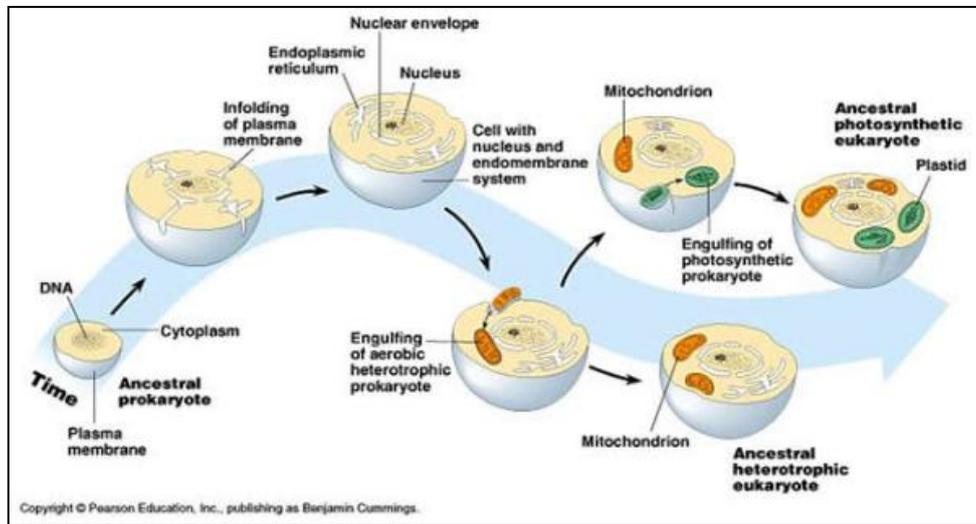
En d'autres termes, les fonctions redox de réduction et d'oxydation autrefois assumées séparativement par les strates de cellules spécialisées (les différentes espèces d'archées ou bactéries primitives) d'un microcosme homogène (tapis microbien, mousse,

---

<sup>174</sup> Après avoir été longtemps rejetée, la théorie de l'endosymbiose, selon laquelle la cellule eucaryote résulte d'une union symbiotique de cellules procaryotes primitives, est aujourd'hui reconnue comme l'une des grandes réalisations de la biologie évolutionnaire du XXe siècle. Apparue dès le XIXe comme une simple hypothèse, elle sera étayée toute sa vie par Lynn Margulis, qui la présenta dès 1966 dans son article : *The Origin of Mitosing Eukaryotic Cells*.

...), seront assumées à partir de ce moment, dans une même cellule à noyau (ou un ensemble de), par des organismes autonomes capables d'affiner sans cesse cette fonction (spécialisation) au long de la sélection naturelle, en s'adaptant aux différents milieux naturels en train de se constituer.

Figure 51: représentation simplifiée du processus d'endosymbiose



Source : <http://www.er.uqam.ca/nobel/m170624/nya-endosymbiose.html>

### 3.2.2.3 L'Ecosphère comme « noyau » de la Biosphère

Falkowsky, biogéochimiste américain, insiste sur ce moment fondamental du métabolisme planétaire :

L'histoire de la Terre peut être divisée en deux périodes majeures. Les premiers 2,5 milliards d'années furent l'éon « de la recherche et du développement », alors que toutes les voies métaboliques principales étaient en pleine évolution. Les derniers 2 milliards d'années ont été l'éon « Microsoft », quand la vie s'appropriera les processus métaboliques déployés durant la première moitié de l'histoire de la Terre pour les commercialiser dans de nouvelles formes<sup>175</sup>. Sur une seule perspective métabolique, l'évolution s'est basiquement arrêtée il y a environ deux milliards d'années. Les animaux et les plantes sont les exemples de nouvelles incarnations d'anciens processus métaboliques ; le monde peut très bien aller sans ces distractions évolutives mineures<sup>176</sup> [Falkowsky, 2009:3].

Ce qui nous permet de passer de l'échelon cellulaire à celui bien plus large de l'évolution géologique planétaire. Cette fracture de l'évolution marque en effet, pour Vernadsky, le début d'une transformation radicale de la Biosphère.

Bien qu'à son époque cette théorie n'était pas démontrée, Vernadsky insiste à de nombreuses reprises sur les différences entre le « champ thermodynamique de la matière vivante » (domaine du vivant), dans lequel les organismes vivants homogènes ont réalisé, sous forme de microcosme, leur travail de formation de la Biosphère (premier principe

<sup>175</sup> Cette métaphore bien américaine n'est pas très heureuse pour des écologues francophones, mais elle marque une juste pensée, fondée sur l'expérience de premier plan de ce grand disciple de Hutchinson et/ou Vernadsky.

<sup>176</sup> D'accord pour la « hauteur » de vue, mais que notre auteur nous permette quand même d'en discuter ; il oublie notamment la *direction de l'évolution*, qui s'accomplira dans l'Ecosphère. Ainsi, finalement, Falkowsky n'aurait été « que » le disciple de Hutchinson, oubliant avec ce dernier, et/ou passant à la trappe, comme nous l'avions observé, les deux principes biogéochimiques.

biogéochimique), et le « champ thermodynamique des organismes vivants autonomes » (maison du vivant), dans lequel va se déployer le grand arbre de l'évolution des espèces (second principe biogéochimique).

Falkowsky et ses partenaires, qui poursuivent et complètent pour le moins les travaux de Hutchinson, nous parlent ainsi de ces « engins microbiens » qui régissent les cycles biogéochimiques terrestres jusqu'à l'échelle planétaire<sup>177</sup>.

Virtually all nonequilibrium electron transfers on Earth are driven by a set of nanobiological machines composed largely of multimeric protein complexes associated with a small number of prosthetic groups. These machines evolved exclusively in microbes early in our planet's history yet, despite their antiquity, are highly conserved. Hence, although there is enormous genetic diversity in nature, there remains a relatively stable set of core genes coding for the major redox reactions essential for life and biogeochemical cycles. These genes created and coevolved with biogeochemical cycles and were passed from microbe to microbe primarily by horizontal gene transfer. A major challenge in the coming decades is to understand how these machines evolved, how they work, and the processes that control their activity on both molecular and planetary scales [ Falkowsky et al. 2008 a].

Ils établissent ainsi une relation très étroite entre les processus régissant l'évolution des organismes à l'échelle moléculaire et l'évolution de la Biosphère à l'échelle planétaire. Une comparaison où nous découvrons que les cycles biogéochimiques fondamentaux de la Biosphère sont régulés par un ensemble de réactions redox régies par des « machines biologiques » infinitésimales, les enzymes, toutes présentes, pour les fonctions fondamentales, à l'intérieur de la première cellule eucaryote issue de l'endosymbiose.

Puisque les organismes vivants, homogènes ou autonomes, ont produit selon la théorie vernadskienne l'habitat dans lequel ils se sont reproduits et ont évolué, et qu'ils l'ont fait selon des « modèles métaboliques » présents dans leur ADN, la Biosphère au global (y compris l'Ecosphère) devient le produit direct de ce métabolisme ; nous pouvons dès lors nous autoriser à regarder les évolutions de la cellule vivante à travers les temps géologiques comme un « modèle réduit » des évolutions du monde vivant à l'échelle planétaire.

Que nous pouvons voir comme une forme d'homothétie, non pas géométrique, mais de nature fonctionnelle (une homothétie fonctionnelle donc), selon laquelle se réalise, depuis l'échelle infinitésimale de la cellule jusqu'à l'échelle planétaire, un ensemble de fonctions élémentaires caractérisées par une organisation et une régulation de nature tout à fait comparable.

A ce point que les protistes, qui avec l'apparition du noyau cellulaire marquèrent le moment fondamental de la prise d'autonomie des organismes vivants, auraient créé le contexte « biogéochimique » dans lequel serait apparu, en parfaite symétrie de leur propre évolution moléculaire, le « noyau » de la Biosphère : l'Ecosphère.

Noyau dans lequel l'« ADN de la Biosphère » va optimiser ses processus de concentration, sélection et multiplication pour former un nouveau champ thermodynamique propre à contenir et permettre l'évolution des espèces.

Ecosphère que l'on peut ainsi s'autoriser à regarder, en terme d'habitat naturel, et selon Vernadsky, comme la « maison » du vivant au centre de son « domaine

---

<sup>177</sup> Nous n'avons pas traduit ce texte en français, car il fait appel à certains termes de la biologie dont nous ne maîtrisons pas vraiment le sens, ce qui pourrait altérer sa signification globale.

d'expansion », la Biosphère ; et au sein de laquelle va se développer la « biodiversité des porteurs de cellules à noyau ».

Ce qui nous amène de nouveau à définir l'Ecosphère comme la somme planétaire des biogéocénoses.

Nous compléterons cette métaphore biogéochimique planétaire de la cellule eucaryote par une nouvelle image fonctionnelle selon laquelle nous assimilerons la partie de la Biosphère externe à l'Ecosphère, au cytoplasme entourant le noyau de la cellule ; et dans lequel nous retrouverons les fonctions de réduction et d'oxydation exercées *séparativement* par les bactéries et archées spécialisées, probablement coordonnées dans leurs fonctions, à l'exemple des chloroplastes et mitochondries du cytoplasme de la cellule végétale.

Une telle métaphore nous permet globalement de bien comprendre en quoi l'Ecosphère représente un champ thermodynamique autonome qui, bien que constitué au sein de la Biosphère et traversé par ses organismes et fonctions, s'en distingue radicalement tout en formant avec cette dernière un tout parfaitement organisé.

Et une telle distinction nous rend susceptibles d'établir des bilans écologiques de transfert des flux de matière et d'énergie entre la Biosphère et les écosystèmes de l'Ecosphère, qui généralement ne sont pas pris en compte par la comptabilité écologique.

#### **3.2.2.4 Fertilité biologique et frontière Ecosphère/Biosphère de la lithosphère**

Dans la continuité de cette métaphore du cytoplasme et du protoplasme, et des rapports extrêmement étroits qui s'établissent à leur frontière commune pour créer le vivant, il nous semble particulièrement significatif de mettre en relief la frontière Ecosphère/Biosphère au niveau de la seule lithosphère.

Du point de vue pédologique de la fertilité des sols, condition première de l'efficacité des cycles biotiques et du développement de la biodiversité, c'est en effet à cet endroit très exact que se mettent en place et se développent les conditions premières de la fertilité biologique.

Sans entrer dans des détails qui deviennent très vite complexes, nous pouvons l'identifier simplement comme la zone d'interface où sont mélangées, notamment par les lombrics :

- Les matières organiques décomposées par les fonctions redox, à oxydation dominante, des eucaryotes de l'Ecosphère ; c'est à dire principalement l'humus,
- Et les matières minérales décomposées par les fonctions redox, à oxydation dominante, des procaryotes de la Biosphère ; c'est à dire les roches sédimentaires provenant de l'oxydation des matériaux « parent » de la lithosphère inférieure, à l'exemple de l'argile.

Ce processus pédologique d'interfaçage, qui souligne toute l'importance du concept de biogéocénose, nous désigne précisément **la couche argilo-humique**, comme composante première de la formation et de la fertilité des sols.

Cette couche marque « le lieu de rencontre » entre la matière vivante et la matière inerte du substrat géologique, qui fit tout l'objet de cette nouvelle discipline, la biogéochimie, et marque l'extrême importance, partout sur notre planète, de l'identification de cette frontière Ecosphère/Biosphère où s'organise et se synchronise un partage des tâches fondateur des cycles biogéochimiques producteurs de biodiversité.

Avec le ver de terre comme grand médiateur !

### 3.2.2.5 Rôles comparatifs Biosphère/Ecosphère vis à vis de la diversité

D'une manière très générale, voir simplificatrice, il nous semble pertinent de pouvoir caractériser, comparativement, les grands rôles de la Biosphère et de l'Ecosphère vis à vis de la diversité, structurale, fonctionnelle et biologique (paragraphe 2.5.4.2.).

La matière vivante aurait permis, par ses fonctions redox, la séparation progressive et la distinction originelle des grands compartiments de la Biosphère, l'atmosphère, l'hydrosphère et la lithosphère (AHL). Elle aurait ainsi fondé une *diversité structurale* primitive des compartiments thermodynamiques qui aura permis le développement et la distinction des règnes du vivant.

Les organismes vivants, à partir de l'endosymbiose, auraient ensuite approfondi cette diversité structurale primitive en structurant les compartiments AHL, et en développant dans le même temps la *diversité fonctionnelle* des écosystèmes et biogéocénoses.

Et au global la diversité biologique spécifique de l'Ecosphère.

Il y aurait donc eu tout d'abord création de « milieux » (domaine du vivant), en volume, et ensuite structuration fonctionnelle de ces milieux par les organismes (en volume) qui les habitent, générant les multiples formes d'habitat des organismes vivants (maison du vivant).

Parvenus à ce point des distinctions entre milieux et organismes, une grande question émerge qui nous poursuivra au long de notre thèse jusqu'à l'établissement final du bilan écologique.

Quand nous regardons nos compartiments AHL en 2D, à partir d'une vision géographique ou cartographique (vue du ciel), d'abord nous ne voyons que deux compartiments sur trois, et ensuite nous affectons automatiquement les organismes vivants qui n'habitent pas le « milieu » hydrosphère, à la lithosphère et ses habitats.

La lithosphère serait-elle donc un milieu ?

Mais si nous ajoutons à notre regard sur ces compartiments une vision transversale, comme par exemple la figure 52 plus bas, et au final les imaginons en 3D, il apparaît que les organismes vivants qui ne peuplent pas l'hydrosphère, peupleraient en volume le « milieu atmosphère », d'une manière beaucoup plus évidente.

Et pour ces deux milieux de développement des organismes vivants, la lithosphère serait regardée du coup comme support commun d'enracinement pour la croissance de toutes les espèces d'autotrophes, et la génération consécutive des différentes formes d'habitat des hétérotrophes.

Ce regard alternatif que nous pouvons porter sur les milieux du vivant nous semble très important, parce qu'il structurera toute l'analyse des relations biochimiques entre les organismes vivants et leur milieu naturel, et consécutivement entre l'homme et la nature.

Nous reviendrons sur ces aspects lorsque nous aborderons, en 3D, le bilan écologique.

### 3.2.3 Caractérisation de l'Ecosphère, la « maison » du vivant

#### 3.2.3.1 Limites spatio-temporelles et zones d'émergence de l'Ecosphère

Comme la figure 13 cherchait à le représenter, l'Ecosphère émerge avec les premiers eucaryotes (protistes, ...) et la grande oxydation, mais ne connaît son véritable développement qu'à partir de l'explosion de complexité du cambrien.

Spatialement, du moment où l'Ecosphère représente la somme des biogéocénoses, il nous semble peu pertinent de chercher à la décrire dans le détail de ses dimensions et limites, celles-ci étant considérablement variables en fonction des types d'écosystèmes, qui peuvent se trouver par ailleurs fortement morcelés dans les zones entourant ou pénétrant les territoires sous contrôle de l'économie.

Il serait beaucoup plus efficace de la définir négativement, par rapport à la Biosphère, qui s'étend sur toute la surface terrestre avec des limites verticales approximativement situées entre la couche d'ozone et la zone de stabilité du diamant d'origine organique.

Ceci en rattachant à la seule Biosphère tous les espaces et étendues où n'importe quelle espèce d'eucaryote, mono ou multicellulaire, ne saurait établir son habitat permanent. On en vient ainsi à pouvoir retirer du volume et de l'espace potentiels de l'Ecosphère, une grande partie de l'atmosphère et de la lithosphère (déserts, ...), de l'arctique et de l'antarctique, des profondeurs de l'hydrosphère (hors fumeurs noirs), etc. Ce qui représente dans tous les cas une diminution considérable d'étendue de l'Ecosphère par rapport à la stricte Biosphère, pour sa partie qui n'interpénètre pas l'Ecosphère.

On discernera peut-être mieux cependant les limites fonctionnelles de l'Ecosphère en « situant » ses lieux d'émergence privilégiés dans la Biosphère originelle ; en les représentant par autant de centres géométriques à partir desquels se développeront autant de cercles concentriques d'influence des espèces, les unes par rapport aux autres.

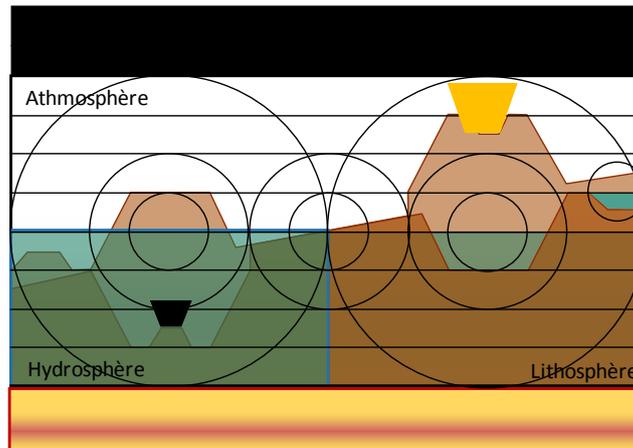
Ces centres géométriques nous semblent exactement situables (par exemple sur un SIG) dans toutes les zones d'interface de la Biosphère où, dans les limites minimales et maximales de température et pression d'existence des eucaryotes, se rencontrent les 3 compartiments de la Biosphère<sup>178</sup> ; et/ou à proximité de tous les lieux disposant d'une source abondante d'énergie et de matières minérales disponibles, en provenance des profondeurs de la Géosphère, comme les fumeurs noirs et les volcans.

---

<sup>178</sup> Les embouchures de fleuve, les zones humides, les lacs et les atolls en sont les meilleurs exemples.

Ce dont le schéma suivant cherche à établir une petite synthèse.

Figure 52 : Zones d'interface de la Biosphère, favorables à l'émergence de l'Ecosphère



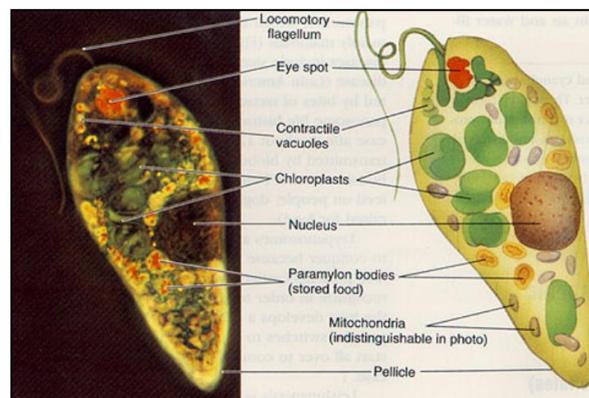
### 3.2.3.2 Fonction redox à réduction dominante des autotrophes de l'Ecosphère

Tous les eucaryotes, autotrophes végétaux et hétérotrophes animaux, intègrent dans leur métabolisme de nombreuses fonctions « redox » (Falkowsky et al. 2008a), qui génèrent une exergie ( $pV$ ), et surtout une pression ( $p$ ) et un volume ( $V$ ) spécifiques à chacun.

A l'échelle globale d'un écosystème ou d'un territoire, nous établirons cependant une distinction première entre fonctions redox des autotrophes et des hétérotrophes. Tous sont en effet des structures dissipatives au sens de Prigogine, mais les autotrophes ont une « fonction réductrice dominante » et primordiale sans laquelle la vie n'aurait jamais pu se développer. Et après laquelle seulement, les hétérotrophes, à « fonction oxydante dominante », prendront le relai pour la complexifier et l'intensifier.

Organisme « modèle » des laboratoires, prototype des nouveaux organismes autonomes issus de l'endosymbiose, le protiste *Euglena* rassemble en lui l'essentiel des fonctions redox du métabolisme premier de la Biosphère, transférées à l'Ecosphère après l'endosymbiose.

Figure 53 : Le protiste *Euglena*



Source : <http://www.hardin.k12.ky.us/west/Meredith/images/euglena.jpg>

Citons le résumé fonctionnel que nous en donne le Wikipédia anglais :

Beaucoup d'espèces d'Euglena ont des chloroplastes photosynthétiques dans le corps de la cellule, ce qui les rend capables de se nourrir par autotrophie, comme les plantes. Cependant, ils peuvent aussi se nourrir par hétérotrophie, comme les animaux. Comme l'Euglena tient ses propriétés à la fois de la plante et de l'animal, les premiers taxonomistes, travaillant sur le système linnéen de classification biologique des deux royaumes, le trouvèrent difficile à classer. C'est cette question qui poussa Ernst Haeckel à ajouter aux **Animale** et **Vegetabile** de Linné un troisième royaume : le royaume protiste.

Nous retrouvons ici Haeckel et la lignée des biologistes évolutionnaires qui, avec Sewertzoff son disciple, puis Schmalhausen le disciple de Sewertzoff, aboutira à la première *synthèse évolutionnaire*, en même temps qu'à *l'école de la directionnalité* fondée autour de Vernadsky.

Il résulta en effet de l'endosymbiose deux types d'eucaryotes, les autotrophes et les hétérotrophes (figure 51). Reprenant à leur compte les fonctions autotrophes de la Biosphère en les « incorporant biologiquement » dans leur cytoplasme (production de glucose et rejet d'oxygène des chloroplastes), les autotrophes de l'Ecosphère vont constituer le tout premier maillon de la nouvelle chaîne trophique de l'Ecosphère ; maillon principalement représenté par les protistes pour l'hydrosphère (maritime/salée, ou terrestre/douce), les plantes (une forme d'amas structuré de protistes) pour la lithosphère, et par les plantes sous marines entre les deux sphères ; à l'exemple de *Zostera noltii*, appelée *Varech de Nolti* ou *Zostère naine*, qui est une espèce marine de plantes à fleurs qui se rencontre sur les fonds marins sableux ou sablo-vaseux.

Mais ce que ne précise pas l'article de Wikipédia, c'est que protistes et plantes contiennent dans leur cytoplasme, en plus des chloroplastes, des mitochondries, tout comme les hétérotrophes ; et que chloroplastes et mitochondries possèdent leur propre ADN ; ce qui confirme leur ancienne fonction autonome de bactéries au sein de la Biosphère, et ce qui leur permet de se « coordonner » dans la réduction et l'oxydation des sucres en combinaison avec l'azote venue du sol. Ils produisent ainsi ensemble tous les acides aminés de la cellule, ainsi que les protéines constitutives de leurs propres tissus.

Comme on le dit des protistes, on dit en général des plantes qu'elles produisent de l'oxygène O<sup>2</sup> en présence de lumière, et du CO<sup>2</sup> en son absence. C'est à dire qu'elles seraient « tantôt » autotrophes et « tantôt » hétérotrophes, en fonction des moments.

Mais il n'en serait pas exactement ainsi, car il est aujourd'hui démontré que les plantes produisent le jour, en même temps que leur oxygène, près des 2/3 de leur CO<sup>2</sup> ; ce qui nous montre qu'elles exercent une bi-fonctionnalité continue (et non pas alternative), soit :

Une fonction « redox » combinant de la manière la plus « synchrone » qui soit, les fonctions autonomes de réduction (photosynthèse des chloroplastes) et d'oxydation (respiration des mitochondries).

Ceci pour produire les différents composés énergétiques et matériaux qui alimentent leurs cellules sous forme de glucides, protides et lipides.

Et c'est sur ces bases que les plantes exercent continuellement, mais avec une intensité variable selon les saisons, deux fonctions principales, assimilables aux deux principes biogéochimiques :

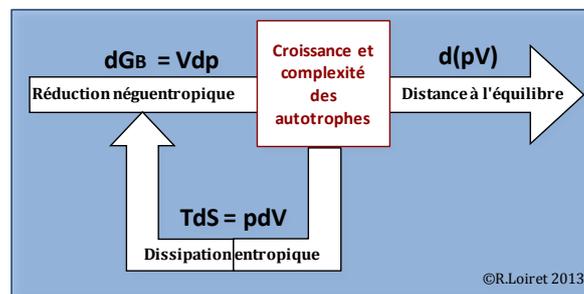
- A - Constitution des stocks d'exergie CHL et structuration de l'Ecosphère : Réduction et stockage d'exergie (croissance de la biomasse, en densité et volume) sous forme de glucides, de réserve ou de paroi (amidon ou cellulose, hémicellulose et lignine (CHL), dans l'ordre, de plus en plus difficilement assimilables par les

hétérotrophes). Les stocks d'exergie du bois structurent tous les habitats de l'Ecosphère.

- B - Production d'exergie GPL et fourniture aux réseaux trophiques : Réduction et oxydation de l'exergie des sucres libres réduits ou en réserve (glucose, fructose, saccharose, ...), absorption du  $\text{NO}_3$  en provenance (principale) du sol, pour produire de l'ATP, de l'azote  $\text{NH}_4$  et  $\text{NH}_2$ , du NADH et des acides aminés (cycle de Calvin, cycle GS-GOGAT et cycle de Krebs) et en alimenter la cellule; puis ensuite production des différentes protéines via l'« information » des acides aminés par l'ARN messenger provenant du noyau concentrant l'ADN. Une chaîne protéique de complexification cellulaire qui comprend de nombreux « sous-cycles » redox alimentant les tissus jeunes, les feuilles, fleurs et fruits, en GPL de plus en plus affinés et spécialisés, qui permettent l'adaptation des espèces aux milieux terrestres et l'alimentation des réseaux trophiques.

Ce qui nous donne finalement une production « parfaitement synchrone » d'entropie négative et positive « incorporées » (dans l'exergie), fonctionnant en feedback (coproduction redox), et en croissance continue ( $d(pV)$ ), qui intensifie sans cesse la distance à l'équilibre thermodynamique des autotrophes. Selon un processus que nous schématiserons ainsi :

Figure 54 : Coproduction redox de la distance à l'équilibre ( $pV$ ) des autotrophes



Ceci même si, au plan thermodynamique, le caractère « dissipatif » de certains arbres et écosystèmes (comme les forêts humides tropicales), au regard de leur caractère « réducteur », peut s'avérer beaucoup plus important en proportion de l'énergie solaire reçue (Schneider et Sagan, 2005, *The secret of trees*, pp. 216-224). Car il en ressortira dans tous les cas un niveau « final » de réduction du carbone beaucoup plus important que partout ailleurs, comme tend à le montrer plus loin le tableau 18.

Et ce qui nous montre que les autotrophes de l'Ecosphère, tout en étant des structures dissipatives, sont en même temps beaucoup plus, puisqu'elles produisent elles-mêmes cet ordre interne si particulier dont se nourrit celui des autres.

Comment dès lors nommer de telles structures ?

### A - Stocks d'exergie-CHL et diversité structurale de l'Ecosphère

Les plantes ne font donc pas que produire et mettre en réserve l'exergie (amidon, ...) pour une utilisation ultérieure en période de croissance et floraison ; fonction des espèces, elles la stockent aussi de manière permanente dans leurs parois tissulaires rigides de soutien et de conduction (CHL), avec un niveau moyen de densité interne qui, dans un espace naturel non domestiqué, augmente au long des espèces et des écosystèmes en tendant vers un maximum de 20,75 MJ/kg pour du bois totalement anhydre (cf. tableau 15).

Agissant en synergie avec la transformation entropique de l'humus (détritivores) et du sol parent (bactéries de la Biosphère), les plantes, en structurant leurs propres tissus, structurent ainsi de plus en plus fortement l'Ecosphère en fabriquant son ossature, son plancher, et son sol (avec les lombrics notamment), ainsi que ceux de tous ses habitats, vus comme autant de champs et sous champs thermodynamiques spécifiques aux espèces d'une biogéocénose donnée.

Les deux tableaux suivants nous désignent ainsi une « directionnalité » des autotrophes qui souligne leur propension à augmenter progressivement leur capacité de stockage de l'exergie, qui induit une augmentation corrélative de l'utilisation d'exergie par le réseau trophique, qui elle-même induira une augmentation de la biodiversité.

Tableau 17 (figure 55) : Stockage et utilisation de l'exergie dans un panel comparatif d'écosystèmes

Ecosystem	Exergy utilization (percent)	Exergy storage (MJ/m <sup>2</sup> )
Quarry	6	0
Desert	2	0.073
Clear-cut forest	49	0.594
Grassland	59	0.940
Fir plantation	70	12.70
Natural forest	71	26.00
Old-growth deciduous forest	72	38.00
Tropical rain forest	70	64.00

Source : Jørgensen et autres, 2007

Tableau 18 (figure 56) : Intensification énergétique (CHL) de quelques espèces forestières

Espèces de bois	Contenu en exergie des CHL	
	MJ/kg séché à l'air	MJ/kg humide
Sapin baumier	9,15	3,20
Epinette blanche	9,56	3,39
Thuja occidental	9,62	3,46
Tilleul d'Amérique	10,03	3,66
Pin blanc	10,09	3,73
Peuplier baumier	10,18	3,82
Noyer cendré	10,27	3,90
Peuplier faux-tremble	10,44	4,02
Pruche	10,56	4,12
Tremble	10,74	4,24
Erable negondo	11,39	4,56
Erable argenté	12,80	5,19
frêne noir	13,34	5,47
Frêne vert	13,34	5,53
Bouleau blanc	13,81	5,80
Cerisier tardif	13,87	5,89
Erable rouge	14,16	6,09
Mélèze laricin	14,16	6,16
Orme d'Amérique	14,46	6,36
Frêne blanc	14,75	6,56
Orme rouge	14,99	6,74
Bouleau jaune	15,46	7,03
Chêne rouge	16,11	7,41
Hêtre à grande feuilles	16,40	7,63
Erable à sucre	17,11	8,04
Caryer cordiforme	17,23	8,18
Chêne blanc	18,06	8,67
Moyenne	13,04	5,51

Sources : Office canadien des forêts et divers

## B - Flux d'exergie-GPL et alimentation des réseaux trophiques

Nous ne parlons pas ici des hétérotrophes, mais de la fonction dissipative de respiration par laquelle les autotrophes de l'Ecosphère (phytoplancton, plantes, ...), après avoir « augmenté quantitativement » leur stock d'exergie, vont « intensifier qualitativement » (complexité), en période de croissance et floraison, le niveau d'exergie de leurs tissus spécialisés en transformant, notamment grâce à l'azote, leurs réserves d'amidon, ainsi que le glucose produit en continu, en GPL de plus en plus diversifiés.

Ce qui permettra leur toujours meilleure assimilation par une chaîne trophique elle même de plus en plus diversifiée, au long de laquelle les organismes développeront une « intensité respiratoire » de plus en plus importante (Zotin, 1978, 1984) ; ce qui augmentera leur rendement entropique d'oxydation des GPL et leur production de néguentropie interne (production d'ordre par l'ordre).

Là où les tableaux précédents illustraient *l'augmentation quantitative* du stockage d'exergie des espèces et écosystèmes, le tableau suivant nous donne un aperçu de *l'intensification qualitative* du niveau d'exergie par unité de masse organique (MJ<sub>GPL</sub>/kg) au long de l'évolution des espèces d'autotrophes et du développement de leurs organes spécialisés (de reproduction notamment).

Tableau 19 (figure 57) : Intensification énergétique (GPL) chez les autotrophes

Contenu en exergie (GPL) de quelques autotrophes	MJ/kg humide				
	Moyenne (sur échantillonnage variable)				Ecart
	Glucides	Protides	Lipides	GPL totaux	GPL totaux
Algues communes	0,215	0,112	0,034	0,361	...
Plantes à fleurs marines (Zostere Noltii)	2,491	0,643	0,210	3,344	...
Plantes à fleurs terrestres (entières ou parties seules)					
<i>Légumes verts feuilles (salade, cresson, ...)</i>	0,315	0,265	0,100	0,680	0,4 à 0,8
<i>Champignons</i>	0,238	0,518	0,158	0,915	0,8 à 1,1
<i>Légumes racines (radis, carotte, ...)</i>	0,619	0,301	0,078	0,997	0,8 à 2
<i>Légumes tiges et/ou feuille (poireau, épinard, ...)</i>	0,479	0,572	0,146	1,198	1,1 à 1,4
<i>Légumes fruits (poivron, tomate, ...)</i>	0,878	0,272	0,129	1,279	0,85 à 2,8
<i>Légumes germes (pousses de soja, ...)</i>	0,886	0,901	0,202	1,989	2
<i>Fruits</i>	2,112	0,172	0,098	2,382	1 à 4
<i>Graines</i>	2,231	1,232	0,324	3,787	3,3 à 4,3
<i>Céréales</i>	11,657	2,319	0,666	14,642	14 à 15,3
<i>Graines et fruits oléagineux, huiles végétales</i>	0,942	3,004	26,706	33,890	30 à 39

Source : Cliqual 2012 et divers

Le pouvoir réducteur des chloroplastes végétaux permet de produire une « exergie primaire » sous forme de glucose (C<sub>6</sub>H<sub>12</sub>O<sub>6</sub>), dont le contenu d'énergie libre à l'état pur est de 2,256 MJ/mole (tableau 5), ce qui pour une masse molaire de 180,156 g nous donne 12,524 MJ/kg.

Pour les autotrophes primitifs de l'Ecosphère, comme les protistes et les algues (dont certaines seraient de simples amas de protistes), qui ne possèdent pas ou très peu d'organes spécialisés, cette exergie primaire est incorporée (cycle GS-GOGAT) dans des GPL et tissus peu diversifiés pour donner une concentration moyenne d'exergie de l'ordre de 0,335 MJ/kg à l'état humide.

Pour les autotrophes évolués de l'Ecosphère, comme les plantes à fleur marines et terrestres, cette exergie moyenne des organismes primitifs aura été comprimée jusqu'à 25

fois dans les cellules de stockage permanent des tissus du bois (cellulose, hémicellulose, lignine - CHL) de certaines espèces d'arbres, dont le niveau moyen d'exergie tourne autour de 5,9 MJ/kg humide.

Dans les branches vertes, les feuilles, fruits et graines, elle aura été par ailleurs « intensifiée » sous forme de GPL à différents niveaux en fonction de la diversité des espèces et de leurs organes :

- Jusqu'à 12 fois pour une plante verte entière maritime à l'exemple de *Zostère Noltii* et certainement plus pour certaines plantes vertes à fleurs terrestres
- Jusqu'à 100 fois et plus pour les graines et fruits oléagineux

Ces GPL étant distribués au réseau hétérotrophe, le niveau d'intensité en exergie GPL des autotrophes devient donc un premier paramètre de mesure de leur complexité comme de la biodiversité du réseau des autotrophes qui va s'en alimenter.

### **3.2.3.3 Fonction redox à oxydation dominante des hétérotrophes de l'Ecosphère**

Les autotrophes n'ont jamais existé seuls. La coproduction de distance à l'équilibre (figures 47, 48, 54) suppose que des « structures dissipatives », au sens strict (selon Prigogine), oxydent les GPL accumulés pour produire une entropie qui interviendra en feedback sur le renouvellement des processus redox (cycles biotiques et biogéochimiques).

Dans une première étape de développement des organismes autonomes de l'Ecosphère, entre -2,6 et -1,6 milliards d'années (figure 13), quand les protistes ont relayé, en les intensifiant, les fonctions de production d'oxygène et de carbone des tapis microbiens de la Biosphère marine, ce sont des espèces de protistes hétérotrophes (à oxydation dominante) qui ont très probablement joué ce rôle. Nous savons en effet que parmi les 300.000 espèces existant de protistes, certaines sont autotrophes comme les microalgues, et d'autres hétérotrophes, comme les protozoaires qui se nourrissent de microalgues.

Dans ces premiers temps de l'Ecosphère, sans compter leur structure calcique, les masses considérables formées par les cellules mortes et les déchets des protistes hétérotrophes ont constitué au fond des mers des stocks de carbone qui n'ont probablement alimenté que des bactéries hétérotrophes, pour connaître ensuite un processus de subduction anaérobie dans les couches supérieures de la géosphère<sup>179</sup>; et c'est ce processus d'oxydation et de subduction du carbone qui, après les mousses bactériennes du microcosme, intensifia la constitution, il y a des centaines de millions d'années, des réserves d'énergie fossile de la planète et beaucoup plus en profondeur des gisements de graphite et de diamant d'origine organique.

Et ce n'est que bien plus tard, au cambrien, que les eucaryotes multicellulaires de l'Ecosphère relayeront les protistes et s'en nourriront pour former de nouvelles chaînes

---

<sup>179</sup> Il en fut de même dans cette période, qui connut une très forte montée en pression de l'oxygène atmosphérique (la « grande oxydation »), pour ce que l'on nomme en anglais les « BIF » (Banded Iron Formation), qui sont des formes distinctes de roches sédimentaires oxydées (oxydes de fer, argent, magnétite,...) datant de l'âge précambrien (figure 13).

trophiques qui intensifieront la production d'exergie-GPL et la diversité fonctionnelle des organismes vivants.

C'est ici que nous trouvons les hétérotrophes de l'Ecosphère terrestre ; leurs cellules pourvues de mitochondries mais privées de chloroplastes réducteurs ne peuvent qu'oxyder les GPL fournis par les autotrophes (cas des herbivores, ruminants, ...) et/ou par leurs proies animales (cas des omnivores, carnivores, détritivores, ...).

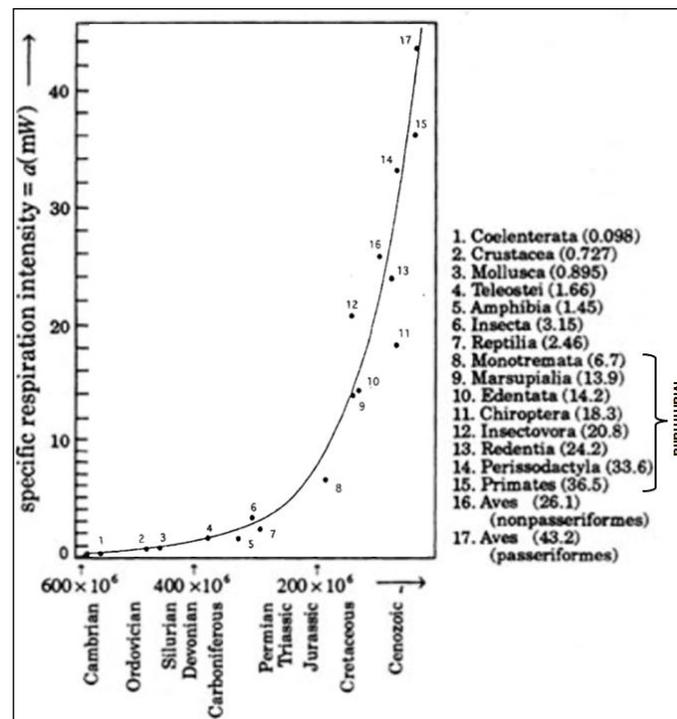
Et tout comme les autotrophes, ils connaissent, après cette première oxydation des GPL qui leur fournit tous les acides aminés vitaux, de nombreux sous-cycles redox de synthèse des GPL spécifiques de leurs divers tissus, organes et fonctions cellulaires spécialisés.

Sous-cycles redox qui produiront au long de l'évolution des espèces une intensification de la production de GPL, parfaitement corrélative à l'intensité respiratoire, dissipative, de leur métabolisme.

Ce que les travaux de Zotin et de ses partenaires (initiateurs de la thermodynamique des processus biologiques ou du développement) sur l'intensification respiratoire des hétérotrophes au cours de l'évolution ont permis de mettre en lumière (Zotin et autres, 1978 ; Zotin, 1984).

Dans le graphique suivant, l'échelle d'intensité respiratoire de Zotin fait apparaître une très forte intensification du métabolisme d'oxydation des hétérotrophes au cours de leur évolution.

Figure 58 : Intensification respiratoire des hétérotrophes au long de l'évolution



Source : Zotin, 1984

Nous pouvons resituer cette échelle d'évolution métabolique sur l'échelle géologique et biologique (figure 13) à partir de l'explosion du Cambrien, qui marque, vers -550 millions d'années (après la première apparition des eucaryotes multicellulaires, vers -700 millions d'années), la montée en puissance de la diversité des organismes multicellulaires et le plein développement de l'Ecosphère.

L'échelle de Zotin met ainsi en relief un développement intensif de la complexité de l'Ecosphère qui révèle là aussi les relations étroites entre intensification respiratoire et métabolique, intensification dissipative, intensification exergétique, développement des réseaux trophiques et biodiversification des espèces.

Notamment l'intensification de la production d'exergie-GPL des hétérotrophes, dont le tableau suivant nous donne un très bref aperçu, aisément corrélable, dans l'ordre des espèces, avec l'intensification respiratoire des hétérotrophes de l'échelle de Zotin.

Tableau 20 (figure 59) : Intensification énergétique (GPL) chez les hétérotrophes

Contenu en exergie (GPL) de quelques hétérotrophes		MJ/kg humide				
		Moyenne (sur échantillonnage variable)				Ecart
		Glucides	Protides	Lipides	GPL totaux	GPL totaux
Mollusca Bivalves	<i>Moule, huître, ...</i>	0,260	2,648	0,430	3,338	...
Crustacea Arthropodes	<i>Crevette, crabe, écrevisse, ...</i>	0,292	3,595	0,250	4,137	....
Mollusca Céphalopodes	<i>Calamar, poulpe, seiche, ...</i>	0,157	3,942	0,398	4,498	4 à 5
Teleostei Poissons communs	<i>Saumon, thon, anchois, ...</i>	0,000	4,475	1,030	5,505	3,9 à 9,11
Mammalia Perisso., artodactyles	<i>Ovins, caprins, bœuf, ...</i>	0,000	4,527	3,142	7,669	6,4 à 9,9
Aves Oiseaux, volaille	<i>Faisan, pigeon, canard, ...</i>	0,033	5,289	3,444	8,766	5,8 à 11,5

Source : Cliqual 2012 et divers

Si nous ne prenons pas en compte les fortes capacités de stockage d'exergie-bois (réduction) de certaines espèces forestières d'autotrophes (tableau 18), le taux moyen de production d'exergie-GPL des autotrophes (plante entière, mais hors cellulose et lignine<sup>180</sup>) semblerait atteindre un maximum tournant autour de 3,5 à 4 MJ/kg humide (tableau 19).

Les exemples du tableau 20 semblent donc établir que les hétérotrophes, à oxydation dominante, prennent leur relai pour continuer à intensifier ce niveau d'exergie-GPL tout au long de la chaîne trophique, grâce à leur capacité croissante de respiration/dissipation entropique.

La directionalité d'oxydation est ainsi partie, avec la directionalité de réduction, d'une directionalité redox toujours plus complexifiée et efficace, caractéristiques des fonctions de l'Ecosphère.

### 3.2.3.4 L'Ecosphère et le second principe biogéochimique

Nous avons vu en détail dans la section 2.1 ce qu'il en était de cette directionalité de l'Ecosphère, au regard du second principe de Vernadsky.

Rappelons brièvement ce second principe et sa formulation élargie :

Lors de l'évolution des espèces, ce sont les organismes augmentant par leur vie l'énergie biogéochimique qui survivent [Vernadsky, 1930:12].

Formulation élargie :

Lors de l'évolution des espèces, la composition chimique de la matière vivante demeure constante, mais l'énergie biogéochimique apportée par la matière vivante dans le milieu cosmique s'accroît [Ibid.].

<sup>180</sup> Certains chercheurs considèrent aujourd'hui que la cellulose et la lignine ne sont qu'un « déchet » du métabolisme des autotrophes. Mais tous les déchets exercent une fonction considérable dans les cycles biotiques, à l'exemple de l'humus.

Puis ajoutons simplement, en forme de conclusion de la présente section, cette citation de Vernadsky, intéressante en ce qu'elle établit le lien direct entre la directionnalité de l'Ecosphère et son second principe biogéochimique.

Il est certain que ce principe (Ndr1 : le second principe biogéochimique) ne peut en aucune façon expliquer l'évolution des espèces et n'intervient pas dans les tentatives d'explication, dans les différentes théories d'évolution qui préoccupent actuellement les savants. Ce principe admet l'évolution comme un fait empirique, ou plutôt comme une généralisation empirique, et le rattache à une autre généralisation empirique, celle du mécanisme de la biosphère. Mais il est loin d'être indifférent du point de vue des théories évolutionnistes et il indique, à mon avis, avec une logique infaillible l'existence d'une direction déterminée dans le sens de laquelle le processus de l'évolution doit nécessairement s'effectuer. Cette direction coïncide parfaitement dans sa terminologie (scientifiquement précise) avec les principes de la mécanique, avec toute notre connaissance des processus physico-chimiques terrestres auxquels appartient la migration biogène des atomes. Toute théorie de l'évolution doit prendre en considération l'existence de cette direction déterminée du processus de l'évolution qui, avec le développement ultérieur de la science, pourra être évaluée numériquement. Il me semble impossible pour plusieurs raisons, de parler des théories évolutionnistes sans tenir compte aussi de la question fondamentale de l'existence d'une direction déterminée, dans le processus de l'évolution invariable, au cours de toutes les époques géologiques [Vernadsky, 1929:269-270].

### 3.2.4 Synthèse de la section : $pV$ , $d(pV)$ et la distance à l'équilibre « redox » du vivant

La fonction d'état des écosystèmes que nous avons proposée, tant pour les stocks (37), que pour les flux (38), à la suite de notre interprétation des principes de Vernadsky, au regard notamment de la conclusion de Clausius (paragraphe 2.1.6.4) deviendrait ainsi une juste expression thermodynamique des fonctions redox de la Biosphère et de l'Ecosphère, vue comme une combinaison réduction/oxydation qui, « seule », serait productrice de la distance à l'équilibre du vivant.

Elle souligne ainsi, par rapport à la thermodynamique, une propriété du vivant qui nous aura apporté quelques significations essentielles, complémentaires à nos explications antérieures du paragraphe 2.1.6.5.

Exprimons-la en forme de synthèse par deux petits schémas, puis commentons-la.

Figure 60 : fonction  $d(pV)$  des cycles biogéochimiques et production de distance à l'équilibre

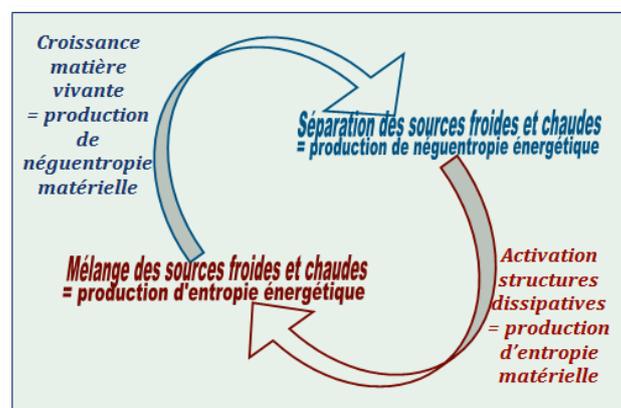
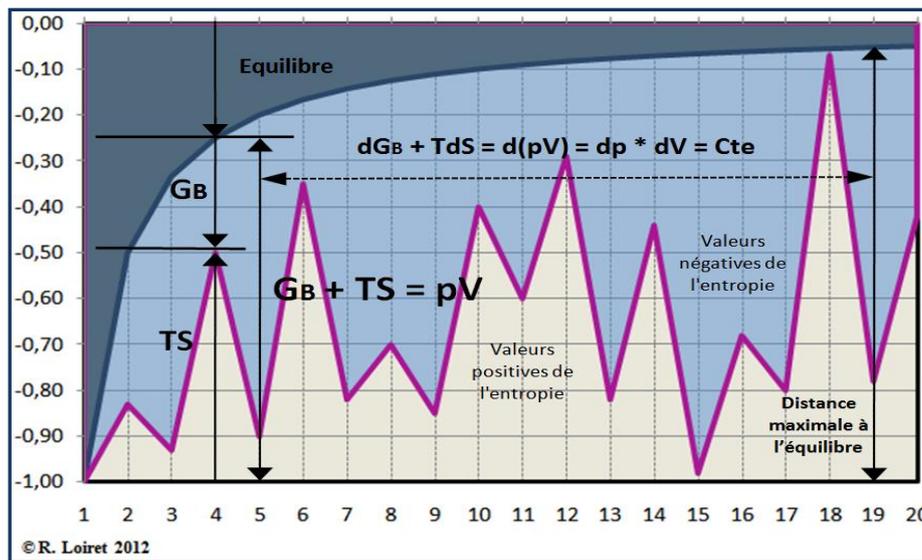


Figure 61 :  $pV$ ,  $d(pV)$  et la production redox de distance à l'équilibre

**Note :** Dans ce schéma, très similaire à celui de l'évolution de l'indice  $Ka$  (figure 32), nous ne devons voir l'équilibre et la distance à l'équilibre que comme un simple intervalle, entre 0 et 1 (une valeur absolue). La valeur maximale -1 n'est ici que relative à la valeur (toujours) négative de l'énergie libre  $G$  incorporée. Entropie négative et positive se complètent ainsi pour élargir ensemble un intervalle de valeur absolue.

#### Commentaires :

L'exergie *biogéochimique* n'existe qu'en proportion du vivant  $I$ , qui lui-même n'existe qu'en proportion de la dynamique « vitale » de ses fonctions redox, de réduction et d'oxydation.

En termes de « stocks », l'exergie biogéochimique, comme produit des fonctions redox est illustrée par la formule  $G_B + TS = pV$  (37), où la pression  $p$  par le volume  $V$  remplacent la néguentropie (l'énergie libre) et l'entropie, une fois celles-ci incorporées dans la matière vivante, tel que le résumait le tableau 7.

En termes de « flux », la variation de l'exergie biogéochimique redox est illustrée par la formule  $dG_B + TdS = d(pV) = dp * dV = Cte$  (38), où la conjugaison de la variation de pression  $p$  et de la variation de volume  $V$ , remplace celle de la variation de néguentropie (d'énergie libre) et d'entropie, une fois celles-ci incorporées dans la matière vivante.

Ce schéma vise ainsi à illustrer le caractère de la fonction d'état que nous avons proposée pour les écosystèmes, avec les fonctions de réduction et d'oxydation de l'énergie libre confondues dans leur production « commune » de la distance à l'équilibre thermodynamique de la Biosphère et de l'Ecosphère ; cette fonction d'état représentant « l'environnement  $pV$  » extérieur à l'économie, toutes exergies constitutives de ses compartiments thermodynamiques étant confondues.

Nous avons vu que l'entropie (positive), considérée isolément, fait tendre vers l'équilibre, mais ne mesure pas pour autant l'équilibre, alors que l'entropie négative creuse la distance à cet équilibre.

Mais à l'équilibre thermodynamique parfait, de valeur statistique  $1/n = 1$  (en ignorant le signe négatif, seulement utilisé ici pour caractériser l'entropie négative), ce schéma montrerait qu'il n'existe ni entropie positive isolée, ni entropie négative isolée.

Ce que confirmait la figure 32 illustrant les variations de l'indice  $\mathbb{K}_a$ , sauf à inclure les variations redox.

Ainsi, entropies positives et négatives n'existeraient « qu'ensemble », et essentiellement dans l'intervalle ou la distance à l'équilibre est progressivement ramené de 1 (-1 dans le schéma) à 0 ; auquel cas, nos deux entropies, de toujours, « coexisteraient » parfaitement, au sein d'une fonction pV dont les variations de pression et de volume alterneraient en continu pour aller toujours plus loin de l'équilibre.

Ou du moins pour l'entretenir, à l'image de la respiration, base du métabolisme des êtres vivants, formée par l'alternance continue d'un inspire et d'un expire.

Ainsi, comme nous l'avons déjà exprimé, les principes biogéochimiques de la Biosphère selon Vernadsky, s'ils font « exception » à la conclusion de Clausius concernant les deux sens de la transformation, ne se révèlent absolument pas contradictoires, et au contraire confirment ces principes de transformation sur lesquels fut fondée cette conclusion.

Ceci quand les principes de l'Anthroposphère la confirment.

Comment traduire maintenant cette fonction redox du vivant dans un système de mesure de la distance à l'équilibre *thermodynamique*, qui serait fondé sur son indice de mesure *statistique* ?

Cela sera tout l'enjeu de nos prochaines propositions, complémentaires à celles de l'indice  $\mathbb{K}_a$ , à partir desquelles nous chercherons à rendre compte des diversités structurales ( $D_S$ ) et fonctionnelles ( $D_F$ ) des organismes et écosystèmes, constitutives de leur diversité biologique ( $D_B$ ), en utilisant les données sur l'exergie CHL et GPL des organismes.

Elles aboutiront à la mesure de leurs distances à l'équilibre de réduction ( $D_{ER}$ ) et d'oxydation ( $D_{EO}$ ), comme composantes distinctes mais indissociables de leur distance à l'équilibre thermodynamique ( $D_{ET}$ ) globale.

### 3.3 L'indice $K_a$ et la distance à l'équilibre thermodynamique ( $D_{ET}$ )

#### 3.3.1 Seconde hypothèse fondamentale

L'exergie partout qualifie l'énergie libre incorporée dans l'exergie *géochimique* de la matière biogène, qui a pu être quantifiée à l'échelle planétaire (Valero Delgado, 2008).

Quid maintenant de l'énergie *biogéochimique* de la matière et des organismes vivants ?

Nous retrouvons ici le deuxième aspect de notre problématique « vitale » (paragraphe 2.4.2), ainsi que les constats préparatoires à sa résolution établis dans notre synthèse du chapitre II (paragraphe 2.5.2).

Telle qu'elles sont mesurées, l'exergie et la densité énergétique des molécules et des composés organisés du vivant sont le produit de la très longue histoire de l'aromorphose planétaire et de la complexification du niveau d'information de la biodiversité.

Ce qui est bien ce que voulait signifier H.T. Odum (1986, 1991, 1996, 2000) dans sa quantification énergétique des écosystèmes, en agrégeant dans les « Solar equivalent joules » (SeJ) l'histoire des forces planétaires ayant concouru à la production de ces molécules organiques et de leurs composés.

Mais il y avait dans les SeJ une forme de densification externe de l'énergie libre incorporée dans la matière organique, qui venait surmultiplier son exergie ( $pV$ ) constatée, supposée constante, quand celle-ci révélait déjà en interne sa propre densité énergétique ( $p$ ), et son propre volume ( $pV/p$ ), comme « produits directs » des couches successives de l'histoire des forces naturelles et de la direction de l'évolution (cf. tableau 7).

Il y avait redondance de l'histoire et de la fonction des forces planétaires.

Tout comme pour les facteurs  $\beta$  de Jørgensen, ce n'était pas en conjuguant l'exergie à un facteur externe que nous manifesterions ses propriétés *biogéochimiques* ; nous nous devons de la conjuguer au facteur interne de diversité différentielle et de densification massique et énergétique qu'elle manifestait « déjà », en allant, à masse et énergie constantes, de plus en plus loin de l'équilibre thermodynamique.

La diversité biologique, produit et acteur de la direction de l'évolution, a ainsi manifesté cette propriété particulière de faire fusionner l'énergie libre  $G_B$  et l'entropie  $TS$  dans une nouvelle matière, organique, et de la faire « monter en pression » pour atteindre une certaine distance à l'équilibre.

La question devient alors de « traduire », objectivement, cette intensification énergétique, et non pas de la « construire ».

Il nous semble que cette propriété de l'exergie *géochimique*, ce point ultime de convergence entre la thermodynamique et la diversité biologique qui manifesterait son caractère *biogéochimique*, serait : sa distance à l'équilibre *thermodynamique*.

C'est à dire la conjugaison de cette exergie avec la distance à l'équilibre *statistique* de sa diversité structurale différentielle  $\beta$ .

L'exergie *biogéochimique* exprimerait ainsi l'utilité essentielle de l'exergie, son niveau d'information-structure.

Pour autant, les cycles biotiques de la Biosphère et de l'Ecosphère nous ont montré que les fonctions « redox » des biogéocénoses intervenaient de concert pour intensifier le

niveau d'information, la diversité différentielle et la production d'exergie des organismes, autotrophes et hétérotrophes, et de leur communauté.

Dans ce processus, pour ce qui concerne les écosystèmes terrestres, le bois très réduit, indigeste (la lignine notamment) tant pour la microflore que pour la microfaune (Deadlock), est éliminé du cycle pour s'enfoncer progressivement dans la lithosphère (subduction) et poursuivre dans les couches profondes de la Biosphère une directionnalité de réduction accomplissant sa distance à l'équilibre.

Les matières organiques digestes sont quant à elles transformées par alternance d'oxydation et de réduction, en humus puis en complexe argilo-humique, pour alimenter et intensifier les cycles biotiques, jusqu'à fournir les plantes qui elles-mêmes conjugueront de manière très étroite les cycles de réduction et d'oxydation pour différencier leurs états matériels, et soit produire du bois, soit produire feuilles, fleurs et fruits.

Tout comme il existe une *directionnalité de réduction*, il existe ainsi une *directionnalité d'oxydation* fonctionnant de concert avec la première. Après la réduction photosynthétique primitive du glucose, la respiration métabolique (oxydation dominante) vient compléter les processus réducteurs pour intensifier avec eux le niveau d'exergie dans les deux sens possibles de l'évolution.

La différence essentielle entre exergie *géochimique biogène* et exergie *biogéochimique*, évidente à la seule comparaison d'un bout de bois mort et d'un arbre en pleine floraison, serait ainsi marquée par l'intensité comparative de la diversité *structurale*, à réduction dominante (pression) et de la diversité *fonctionnelle*, à oxydation dominante (volume, respiration, dissipation des différentes espèces), agissant de concert sur une simple masse de matière organique, un organisme, végétal ou animal, ou un écosystème ; et produisant ensemble la diversité *biologique*.

Cette différence « marquerait » le passage entre la diversité *structurale* de simples masses différenciées de bois mort ou de carbone d'un écosystème, et la diversité *biologique* de cet écosystème à l'état vivant d'une croissance végétative et d'une floraison.

Et elle serait constatée par la distance à l'équilibre thermodynamique « redox », qui serait constituée de deux parties additives (susceptibles de se subdiviser) exprimant la fonction d'état des écosystèmes que nous avons proposée :  $pV$  (37), et sa variations  $d(pV)$  (38). Elle mesurerait le niveau d'activité « vitale » d'un organisme ou d'un écosystème, selon qu'il serait vivant ou eutrophié.

Notre seconde hypothèse fondamentale se résume ainsi en deux parties :

- (a) L'exergie géochimique, rapportée à son niveau de diversité différentielle et de pression interne, manifesterait l'exergie *biogéochimique* du vivant par sa distance à l'équilibre *thermodynamique* ( $D_{ET}$ ).
- (b) La distance à l'équilibre thermodynamique ( $D_{ET}$ ) résulterait des deux composantes de la diversité biologique ( $D_B$ ) : la diversité *structurale* ( $D_S$ ), à réduction dominante, et la diversité *fonctionnelle* ( $D_F$ ), à oxydation dominante, qui agiraient de concert pour produire l'exergie biogéochimique. La  $D_{ET}$  serait ainsi composée de deux parties distinctes, additives et redox :
  - La distance à l'équilibre de réduction ( $D_{ER}$ ), comme produit des processus organiques à réduction dominante ; ceci comme on l'observe pour une masse de bois, de tourbe, d'énergie fossile ou de carbone pur.
  - La distance à l'équilibre d'oxydation ( $D_{EO}$ ), comme produit des processus organiques à oxydation dominante de l'Ecosphère, comme on l'observe, tant

chez les autotrophes (feuillage, floraison, fructification), que chez les hétérotrophes (croissance organique, intensité respiratoire, ...).

Si nous mettions au point l'unité et le système de mesure de ces deux composantes de la distance à l'équilibre thermodynamique ( $D_{ET} = D_{ER} + D_{EO}$ ), et si notre hypothèse était vérifiée, elles seraient susceptibles de rendre compte des dimensions structurales et fonctionnelles de la diversité biologique, et de mesurer ensemble l'exergie *biogéochimique* du vivant, en forme de produit de l'activité vitale d'un organisme, d'un écosystème ou d'un territoire.

Elles nous donneraient ainsi une mesure biophysique de nos actifs écologiques en forme de production d'ordre de l'Ecosphère et de la Biosphère, opposable à sa consommation par les activités de l'Anthroposphère (passifs écologiques) ; ce qui autoriserait l'établissement d'un Bilan écologique des relations homme-nature.

Nous étudierons maintenant nos propositions concernant cette unité et ce système de mesure, que nous avons subdivisé en deux parties :

- La conjugaison pV.m et la  $D_{ET}$
- La mesure des deux composantes de la  $D_{ET}$ , la  $D_{ER}$  et la  $D_{EO}$ .

Nous chercherons ensuite à vérifier la pertinence de ces propositions, en appliquant ce système de mesure aux situations en grandeur réelle d'un petit écosystème marin et d'un grand territoire de la lithosphère.

### 3.3.2 Conjugaison pV.m , Joule.mètre et $D_{ET}$

L'exergie pV se mesure en joules, soit une pression en  $J.m^{-3}$  (joules par  $m^3$ ) x par un volume en  $m^3$ . Nous savons par ailleurs qu'un Joule = un N.m (Newton x un mètre), et que la pression peut tout aussi bien s'exprimer en  $N.m^{-2}$ .

Intéressons-nous maintenant aux  $N.m^{-1}$  (Newton par mètre), avec les  $J.m^{-2}$ , leur équivalent en joules. La littérature scientifique nous dit que ceux-ci caractérisent la « tension superficielle », ou « tension de surface », qui résulte du type de matière et de sa pression interne spécifique en interface avec un autre milieu.

Cette tension superficielle est pour ce qui concerne l'eau très bien caractérisée par les *Gerris* (araignées d'eau) qui sont un genre d'insectes hémiptères qui ont la capacité de se déplacer sur l'eau, avec une adresse qui leur vaut aussi le nom de « patineurs d'eau ». Les pattes des *Gerris* sont munies de poils très hydrophobes, alors que la tension superficielle de l'eau repousse les substances hydrophobes posées à sa surface.

[Figure 62 : Les Gerris et la tension superficielle de l'eau](#)



Source : Wikipédia

Selon que l'on parle de  $N.m^{-1}$  ou de  $J.m^{-2}$ , deux explications un peu différentes de la tension superficielle prévalent. On parlera soit d'une certaine contrainte linéaire en tension partant de l'intérieur d'un milieu dense et se dirigeant vers sa surface ( $N.m^{-1}$ ), soit d'une énergie par unité de surface extérieure dont l'origine est la force de cohésion entre les molécules identiques d'un même milieu ( $J.m^{-2}$ ).

Notons qu'il existe entre la tension et la pression une relation linéaire telle que  $J.m^{-3} \times m = J.m^{-2}$ . Elle est très bien exprimée par la « tension artérielle », qui est une force exercée par la pression du sang sur les parois des artères et qui les tend.

Ne regardons plus maintenant la tension en surface, et essayons d'exprimer ce que pourrait être la tension en volume, par différence avec la pression volumique.

Nous considérerons deux cas différents :

- Un volume uniforme d'eau ou d'une matière quelconque (air, gélatine,..),
- Un volume constitué d'eau, mais aussi de différents types de matières biogènes et/ou d'organismes (pollution, vase, algues, divers organismes autotrophes et hétérotrophes), ayant chacun leur propre volume. Soit un volume de biodiversité.

**Dans le premier cas**, pour mesurer la tension d'un volume uniforme, nous multiplierons sa tension de surface en  $N.m^{-1}$  par son volume spécifique.

Nous obtiendrons des  $N.m^{-1} \times m^3 = N.m^2$  (Newton  $\times m^2$ ), à ne pas confondre avec la pression ( $N.m^{-2}$ ). Ils nous montrent bien qu'il s'agit d'une même force que la pression, mais inversée, soit dirigée de l'intérieur vers l'extérieur.

C'est une tension interne, qui caractériserait l'état interne du volume de matière considéré, et plus concrètement son type de matière contenue.

Pour mieux en prendre la mesure, remplissons un ballon gonflable avec de l'air, de l'eau ou de la gélatine plus ou moins épaisse. Il suffit que nous appuyions avec le doigt sur la surface du ballon pour « éprouver » la différence de matière interne, qui se résume ainsi très bien dans sa tension de surface.

Exprimée en joules, cette tension interne nous donnera des « joules.mètre » ( $J.m = J.m^{-2} \times m^3 = J \times m$ ), à ne pas confondre avec le *Joule mètre*, cet appareil qui permet de mesurer l'énergie en joules.

Or l'indice  $K_a$  de distance à l'équilibre se mesure en (parties de) mètre, et son évaluation pour quelques molécules organique de base, fondée sur la diversité différentielle de leur masse interne, est très fortement corrélée (cf. tableau 14 et figure 43) avec leur densité massique ( $1/V$ ), comme fonction directe de la pression interne ou densité énergétique de ces mêmes molécules (cf. tableau 7).

Le Joule.mètre représenterait ainsi, à priori, la densité énergétique d'un volume de matière conjuguée à sa diversité différentielle  $\beta$ , exprimée ici par l'indice  $K_a$ .

**Le second cas** nous permet de préciser le concept.

Comme nous l'avons vu dans notre paragraphe de synthèse sur les relations entre exergie et biodiversité (paragraphe 2.5.4), le contenu énergétique total d'un volume d'eau « habité » par différents volumes de matière spécifique est assimilable au concept d'énergie libre (25), qui somme des volumes spécifiques conjugués à leur potentiel chimique  $\mu$  (24).

Si ces volumes spécifiques  $V$ , d'une pression  $p$  donnée pour chacun d'eux, étaient des molécules ou des organismes d'espèces différentes, nous pourrions alors dire que se

dégage de leurs relations une tension globale d'interface résultant de leur différentiel global de pression spécifique et s'exerçant simultanément sur toutes les surfaces de ces volumes organiques en interaction les uns avec les autres.

Nous pouvons interpréter cette nouvelle quantité comme une « tension volumique interspécifique » résultant de toutes les pressions spécifiques des volumes en interaction, et s'exerçant sur toutes leurs faces.

Un bon exemple étant dans ce cas la pression globale (et dynamique) d'une foule lors d'une bousculade ou d'une manifestation.

Nous touchons ici concrètement à la notion de « pression de biodiversité ».

Comment mesurer cette tension d'interface, en cohérence avec notre premier cas ?

Cette *tension volumique interspécifique* ne semble pouvoir être que le produit (la conjugaison) de :

(a) L'énergie libre  $G : \sum_i n_i \cdot \mu_i$  (25), soit l'énergie pV de l'écosystème (s'il s'agit d'un écosystème).

Et de :

(b) Sa propre diversité différentielle (ou structurale) qui, dans notre analogie entre énergie et diversité statistique du paragraphe 2.5.4., était donnée par la formule de la diversité  $\beta : \sum_i n_i \cdot \mu_i / \sum_i n_i$  (39), assimilée depuis à la distance à l'équilibre statistique de l'écosystème estimée en (partie de) mètre par l'indice  $\mathbb{K}a$ .

Ce qui nous donnerait finalement la formule de la tension interspécifique :

$$\sum_i n_i \cdot \mu_i * \left( \frac{\sum_i n_i \cdot \mu_i}{\sum_i n_i} \right) \quad (41)$$

C'est à dire une nouvelle expression de la diversité, que nous pourrions pourquoi pas nommer diversité delta ( $\Delta$ ,  $\delta$ ), pour faire suite aux précédentes, d'autant qu'elle est le produit de  $\gamma * (\gamma/\alpha = \beta)$ .

Qui serait donc mesurée en *joules.mètre*, soit l'exergie pV conjuguée à l'indice  $\mathbb{K}a$ .

Les joules.mètre mesureraient ainsi la « tension volumique interspécifique » d'une diversité  $\beta$ , vue comme la pression énergétique de la diversité biologique, ou plus directement, comme nous avons une énergie conjuguée à une distance à l'équilibre statistique, *une distance à l'équilibre thermodynamique* !

Le Joule.mètre (J.m), produit de la conjugaison pV.m, deviendrait ainsi l'unité de mesure de *la distance à l'équilibre thermodynamique* ( $D_{ET}$ ), qui exprimerait l'exergie *biogéochimique*.

Soit une exergie *géochimique* « comprimée » par sa diversité différentielle structurale mesurée en (parties de) mètre, qui refléterait une utilité fondamentale du vivant que ne pouvaient donner ni l'exergie pV ni sa pression p.

Le *Joule.mètre* deviendrait ainsi, par extension de tous nos développements précédents, l'unité de mesure de la *diversité biologique*.

Après réflexion, deux noms sont apparus propre à le qualifier : Le *Loir* ou le *Jem*.

Notons que pour le cas très particulier du diamant, dont l'indice de distance à l'équilibre est selon nos calculs extrêmement proche de 1 (selon son degré de pureté), son exergie en joules serait quasiment égale à sa  $D_{ET}$  en joules.mètre.

### 3.3.3 Mesurer les deux composantes de la $D_{ET}$ : $D_{ER}$ et $D_{EO}$

La distance à l'équilibre thermodynamique ( $D_{ET}$ ) serait composée de deux parties distinctes, additives et redox, fonctionnant en tandem :

- La distance à l'équilibre de réduction ( $D_{ER}$ ), comme produit des processus organiques à réduction dominante,
- La distance à l'équilibre d'oxydation ( $D_{EO}$ ), comme produit des processus organiques à oxydation dominante.

Nous étudierons maintenant le système de mesure que nous proposons pour en rendre compte.

#### 3.3.3.1 De la molécule à l'organisme, et de l'écosystème au territoire : Complexification métabolique et changement d'échelle

Nous avons pu à priori vérifier par différentes corrélations positives la directionnalité de réduction, qui aurait animé les fonctions de la Biosphère depuis les temps les plus reculés, et qui agit de manière continue depuis l'Ecosphère jusqu'aux zones profondes de la Biosphère, après la sortie des cycles biotiques.

Les travaux de Zotin (1978, 1984) sur la thermodynamique des processus biologiques (qui s'inscrivent dans la continuité de ceux de Sewertzoff et de Prigogine), ont quant à eux particulièrement vérifié la directionnalité à oxydation dominante de l'Ecosphère, avec le processus d'intensification des capacités respiratoires et de dissipation entropique des hétérotrophes au long de l'évolution des espèces (figure 61).

Processus que nous avons cherché à vérifier dans notre précédente section, depuis les autotrophes jusqu'aux hétérotrophes de l'Ecosphère, en utilisant des mesures simplifiées d'exergie GPL.

Mais en passant de la réduction à l'oxydation (dominantes), la seule observation d'un arbre montre que nous passons de tissus cellulaires de stockage relativement homogènes (tiges, troncs, branches et racines), qualifiables et différenciables par leur exergie massique ou leur densité énergétique (MJ/kg ou /dm<sup>3</sup> de cellulose, bois,...)<sup>181</sup>, à des tissus de croissance et de reproduction (feuilles, fleurs, fruits, graines, de toutes espèces) de plus en plus complexes et diversifiés.

Et il devient rapidement impossible, en dehors de nos tableaux simplifiés (17 à 20), d'établir à l'échelle écosystémique une synthèse significative d'un état caractérisant la directionnalité énergétique de la chaîne d'oxydation (dominante) ; état qui doit forcément pouvoir prendre en compte des multiples tissus de multiples espèces d'organismes. Ceci d'autant que l'humidité intervient de plus en plus au long de cette chaîne.

Quand la réduction, au seul sens de la capacité à réduire le gaz carbonique et l'eau en molécules de glucose, ne concernait que les autotrophes, l'oxydation/respiration concerne maintenant toute la chaîne trophique et introduit de fait la dimension de l'évolution des espèces hétérotrophes, dans leur capacité métabolique à intensifier leur énergie interne.

---

<sup>181</sup> On verra notamment le rapport de Doat (1977), sur *Le pouvoir calorifique des bois tropicaux*. Toutes les espèces tropicales « de bois » sont au mieux différenciées par leur « pouvoir calorifique supérieur (pcs) », assimilé à leur contenu en énergie libre, mesuré en MJ/dm<sup>3</sup>. C'est à dire par leur « densité énergétique ».

Or la complexité des composants et des échanges métaboliques y devient de plus en plus intense jusqu'à devenir incommensurable.

En passant de la directionnalité de réduction à la directionnalité d'oxydation, nous traversons en fait cette barrière fondamentale qui il y a environ 1,7 milliards d'années a distingué l'Ecosphère de la Biosphère, et avec elle les eucaryotes des procaryotes, et plus encore les eucaryotes autotrophes des hétérotrophes (figure 24).

Barrière qui introduit le second principe de Vernadsky, qui nous fait passer d'un processus d'intensification énergétique par réduction dominante de tissus relativement simples, à un processus d'intensification énergétique par oxydation dominante et complexification croissante des tissus et espèces de l'Ecosphère.

Comment dès lors caractériser par une mesure énergétique homogène et cohérente cette différenciation des processus produisant la  $D_{ET}$  ?

### 3.3.3.2 Les CHL & GPL : Une obligatoire simplification des mesures

Les agronomes et spécialistes de l'alimentation, obligés de passer des sciences fondamentales aux sciences appliquées, ont été depuis bien longtemps confrontés à une telle problématique.

Là où Zotin et Jørgensen ont mis au point des protocoles de mesure du niveau d'oxydation des organismes très complexes à mettre en œuvre, ces agronomes ont dû trouver pour leur part des solutions simples, à même de différencier qualitativement, par des quantités facilement mesurables, la grande variété des espèces d'organismes de la chaîne agricole et alimentaire.

Ils ont alors élaboré, pour les écosystèmes « sous contrôle économique » (sylviculture, pêche, agriculture, ...), depuis les autotrophes jusqu'aux hétérotrophes, des tables de valeur fondées notamment sur la composition des organismes et espèces en matières carbonées et azotés.

Et parmi lesquelles nous trouverons la composition globale en : matière sèche, matière organique, matières azotées totales, matières protéiques digestibles, matières grasses, cellulose brute, etc. (Soltner, 1978).

Cela représente, certes, une « simplification », car ils positionnent ainsi sur une même échelle de comparaison, des molécules chimio-organiques simples et homogènes, comme la cellulose, et des tissus organiques très complexes, participant d'une observation à l'échelle d'organismes entiers, comme les matières protéiques digestibles.

Mais qui donc fera, à l'échelle des organismes, les équations stœchiométriques vérifiant les lois de conservation de la masse et de l'énergie, pour mesurer l'exergie de telles matières protéiques ?

Car on ne saurait les déduire des travaux fondamentaux sur l'exergie, aussi précis qu'ils soient, comme ceux de Szargut, Valero et autres (2005) et de Valero (2008). Ces auteurs ne se sont pas risqués à un tel exercice, restreignant leurs calculs aux seuls molécules chimiques et à leurs composés (matières biogènes), comme les différentes roches, l'atmosphère et l'eau de mer.

C'est comme si nous voulions traduire des transformations bien plus complexes que le modèle généralisé de transformation de la figure 16, en équations stœchiométriques aussi précises que celles du tableau 5.

Les différentes tables de valeur énergétique établies par les agronomes et les industries agricoles et alimentaires furent ainsi une simplification d'échelle, mais qui s'avéra obligatoire et incontournable. Et comme elle « fonctionne » ainsi depuis des décennies à l'échelle de la planète économique, en ayant été éprouvée par des millions d'agronomes, de techniciens agricoles, d'agriculteurs/éleveurs, et de praticiens des IAA, c'est bien la preuve de sa justesse et de son « utilité ».

Et dans tous les cas une simplification qui n'a rien à envier à cette simplification dont Jørgensen et ses partenaires firent usage en considérant que (paragraphe 2.3.3.) :

... des organismes plus évolués ou plus élémentaires ont approximativement la même stœchiométrie ; ainsi leur exergie sera égale, ce qui est en contradiction avec le contenu en information de l'exergie<sup>182</sup>.

Car ces tables suffisent justement à caractériser « autant que nécessaire » une différence d'espèce par une différence de contenu énergétique (cf. tableaux 18 à 20, que nous pourrions détailler bien plus).

Entre deux simplifications, nous avons donc retenu la plus simple et surtout la plus utile, qui aura finalement deux grands avantages :

- Elle nous permettra de traduire en exergie tout aussi bien la composition en cellulose, hémicellulose et lignine (exergie-CHL, cf. tableau 18) de la part réduite dominante des autotrophes, que la composition en glucides, protides et lipides (exergie-GPL, cf. tableaux 19 et 20) de la part oxydée dominante des différents organismes autotrophes et hétérotrophes d'un écosystème ; ce qui nous fournit, pour les deux directions de l'évolution, une exergie massique facilement mesurable et parfaitement étalonnée depuis des décennies.

- Et nous permettra par contre coup d'établir une « stœchiométrie » simplifiée, quand nous passerons à l'échelle des territoires.

Ce qui rend du coup relativement simple et parfaitement faisable la différenciation des organismes par leur niveau d'exergie CHL-GPL et, sauf à en déduire un différentiel de complexité/distance-à-l'équilibre, devrait nous permettre de vérifier le « réalisme » d'une conjugaison de l'indice  $K_a$  avec une énergie, pour les deux dimensions à caractériser de la  $D_{ER}$  et de la  $D_{EO}$ , à l'échelle des organismes, des écosystèmes et des territoires.

Comme nous l'avons déjà exprimé, nous n'avons pas la prétention « scientifique » de différencier les espèces (jusqu'à l'homme du singe) par un niveau exergétique, comme d'autres ont cherché à le faire ; mais de rendre la « qualification différentielle » des écosystèmes aussi simple à mettre en œuvre et « utile » que les outils mis au point par les agronomes, nutritionnistes et ... énergéticiens, au long des décennies, dans leur pratique quotidienne de la matière agricole et économique.

Ce qui nous pousse à passer du scientifique au technique, afin notamment de permettre, le plus simplement et justement possible, les « bilans écologiques » qui s'imposent à l'ensemble d'une économie désormais confrontée aux dramatiques effets environnementaux de ses prétentions de domination sur la nature.

Pour caractériser la diversité biologique, nous ne mesurerons donc plus une quantité (ou poids) d'information du génome corrigée (facteur  $\beta$ ), mais la seule qualité de

---

<sup>182</sup> Comment vouloir caractériser la direction de l'évolution, et dire dans le même temps que l'exergie est égale ?

l'information donnée par la différentielle d'intensification énergétique des organismes d'un écosystème.

Différentielle que nous donne l'indice  $K_a$ , qui n'est plus un indice de vérification de la biodiversité à posteriori, comme était supposé le faire l'indice de Shannon, mais un outil de caractérisation directe et in situ de cette biodiversité.

Ainsi les diversités structurales et fonctionnelles produites par les forces de travail différenciées du vivant ne nous seront plus données par un facteur extérieur « construit », comme en arrivaient à le faire l'énergie d'Odum et l'éco-exergie de Jørgensen, mais par l'exergie massique « réelle » des organismes, dont la diversité différentielle « réelle » sera mesurée in situ par l'indice  $K_a$ , pour les deux dimensions de la réduction et de l'oxydation (dominantes).

Et qu'une diversité différentielle soit mesurée avec 10 ou 10.000 variables, qualitativement cela importe peu, car le résultat sera exactement le même, pour peu que la quantité reflète une même structure différentielle, comme le montre l'indice  $K_a$ .

Quelle que soit la masse de l'information, nous ne mesurerons ainsi la complexité/biodiversité d'un organisme ou écosystème, que dans sa capacité à générer une intensité énergétique (dans l'étendue d'une échelle de 0 à 1 qui peut compter des milliards de subdivisions) engendrant une plus ou moins grande distance à l'équilibre.

Pour peu que nous démontrions que cela, aussi, « fonctionne », et que nous puissions ensuite établir une « comparaison » du fonctionnement des différents outils.

### 3.3.3.3 Système de mesure de la $D_{ER}$ et de la $D_{EO}$ , de l'écosystème au territoire

Le système de mesure de la  $D_{ER}$  et de la  $D_{EO}$  sera ainsi fondé sur :

- L'utilisation des CHL et GPL pour mesurer l'exergie *géochimique* redox totale d'un écosystème (formule 25) et estimer la corrélation de l'indice  $K_a$  avec cette exergie,
- La conjugaison (pV.m) de cette même exergie massique avec ses indices de réduction et d'oxydation, pour mesurer en J.m la  $D_{ET}$  ( $D_{ER} + D_{EO}$ ) et caractériser l'exergie *biogéochimique* du vivant.

Nous allons maintenant chercher à vérifier ce système de mesure en grandeur réelle, depuis un petit écosystème jusqu'à l'échelle d'un territoire.

Pour les petits écosystèmes, c'est à l'échelle d'observation des organismes autonomes au sein de leur écosystème que Jørgensen et ses partenaires ont mis au point le facteur  $\beta$ , supposé conjugable avec une énergie.

C'est donc à cette même échelle, et en nous fondant sur les mêmes données, afin notamment de pouvoir établir une comparaison des outils, que nous appliquerons dans une première étape notre système de mesure.

Nous chercherons ainsi à établir une première vérification de sa mise en œuvre, ceci comparativement à l'éco-exergie et aux facteurs  $\beta$  de Jørgensen.

Nous chercherons ensuite à estimer, pour ce même écosystème, la pertinence de la conjugaison pV.m, pour la  $D_{ER}$  et la  $D_{EO}$ , dans l'établissement de son « diagnostic vital ».

Nous élargirons ensuite l'application de notre système de mesure à l'échelle d'un territoire, notre objectif final étant de mesurer son Actif écologique.

Sachant que nous élargirons le principe de son application aux très grands territoires (pays), jusqu'à la Biosphère, quand nous parviendrons au Bilan écologique, comparant Actif et Passif écologique.

A cette échelle des grands territoires, notre méthodologie, que nous détaillerons en temps voulu, sera par contre un peu plus complexe que pour un écosystème, tout en nous fondant toujours sur les données simplifiées des CHL et GPL.

Nous passerons d'un simple système de mesure à un cadre méthodologique de mesure généralisable.

Nous établirons alors une « stœchiométrie territoriale », qui nous mènera à établir un bilan massique et énergétique des territoires (écosystémiques), à énergie et masse constante, soit un bilan *thermodynamique*.

Elle aboutira, tout comme pour les petits écosystèmes, à la mesure de la  $D_{ER}$  et de la  $D_{EO}$ , cumulées dans la  $D_{ET}$  du grand écosystème.

Ceci en différenciant pour ce dernier les stocks accumulés et les flux annuels, soit l'exergie  $pV$  (37) d'un territoire et sa variation  $d(pV)$  (38), qui forment ensemble les deux constantes de la fonction thermodynamique des écosystèmes susceptibles de mesurer nos actifs écologiques.

### 3.4 Mesure de la $D_{ET}$ ( $D_{ER} + D_{EO}$ ) d'un écosystème : Vérification, comparaisons et pertinence

L'objectif de cette nouvelle section est de mettre en œuvre et vérifier l'outil de mesure des actifs écologiques territoriaux (ou de l'Actif écologique) que nous proposons, et pour ce faire d'en étudier l'application en grandeur réelle à un petit écosystème, avant d'envisager son élargissement à plus grande échelle.

#### 3.4.1 Objectifs de vérification

Nous distinguons deux phases de vérification de notre système de mesure :

##### A - Aptitude à mesurer la diversité d'un écosystème et sa directionnalité :

- Tester l'indice  $K_a$  en grandeur réelle au regard des échecs rencontrés par Jørgensen et ses partenaires avec l'indice  $H'$  de Shannon (paragraphe 2.4.1.1.). Pour cela comparer les corrélations obtenues entre les niveaux de diversité obtenus selon les deux systèmes de mesure (écoexergie et exergie CHL-GPL), et les indices  $H'$  et  $K_a$ .

- Vérifier si l'exergie CHL-GPL est suffisante à caractériser les organismes vivants, et à nous fournir un niveau de diversité biologique de l'écosystème, comparable avec le même niveau obtenu avec l'éco-exergie (facteurs  $\beta$ ). Pour cela comparer les variations de diversité et leur signification selon les deux systèmes de mesure.

- Vérifier la capacité des deux systèmes à caractériser une directionnalité redox du vivant, au moyen de l'indice  $K_a$ .

##### B - Aptitude à rendre compte de l'activité vitale d'un écosystème :

- Vérifier si l'exergie CHL-GPL est suffisante à distinguer les fonctions redox des organismes vivants, et à nous permettre de distinguer les distances à l'équilibre de réduction et d'oxydation ( $D_{ER}$  et  $D_{EO}$ ).

- Tester, en se fondant sur les exergies CHL et GPL, la conjugaison pV.m en grandeur réelle. Et pour cela (a) mesurer, à partir de ses diversités structurales et biologiques, la distance à l'équilibre thermodynamique ( $D_{ET} = D_{ER} + D_{EO}$ ) de l'écosystème, supposée nous donner son niveau d'exergie *biogéochimique*, et (b) tester les capacités de la conjugaison pV.m pour la  $D_{ER}$  et de la  $D_{EO}$  à rendre compte de l'activité vitale d'un écosystème.

#### 3.4.2 Etude de cas : L'écosystème marin de l'estuaire de Mondego (Portugal)

##### 3.4.2.1 Données de référence

Pour établir nos mesures comparatives et de vérification, nous avons utilisé les données (en grandeur réelle) provenant de l'écosystème marin de l'estuaire de Mondego (Portugal), où Jørgensen et ses partenaires ont effectué de nombreux relevés et de nombreuses études dans les années 2000. Elles nous sont données dans leur ouvrage de référence, *A New Ecology. Systems Perspective*, développant leur nouvelle *Théorie des écosystèmes* (Jørgensen et autres, 2007).

Le tableau suivant nous présente les données fondamentales (Ibid., chap. 9) :

Tableau 21 (figure 63) : Données de l'écosystème de Mondego

Contributors	Non-eutrophicated area	Intermediate eutrophicated area	Eutrophicated area before the algae crash	Eutrophicated area after the algae crash
<i>Enteromorpha + Ulva</i>	2.099	28.211	264.642	1.273
Other macroalgae	16.141	2.138	6.152	0.165
<i>Z. noltii</i> leafs	128.368	0.000	0.000	0.000
<i>Z. noltii</i> roots	87.975	0.000	0.000	0.000
<i>Z. noltii</i> -total	216.343	0.000	0.000	0.000
Anthozoa	0.003	0.000	0.000	0.000
Sipunculia	0.001	0.001	0.001	0.002
Nemertinea	0.005	0.003	0.005	0.001
Oligochaeta	0.128	0.031	0.010	0.002
Polychaeta	1.254	0.709	0.569	0.846
Mollusca	63.950	14.192	31.195	13.240
Crustacea	1.372	1.088	14.945	3.419
Insecta	0.007	0.006	0.009	0.001
Echinodermata	0.000	0.000	0.000	0.000
Pisces	0.000	0.006	0.034	0.000

Note: For the non-eutrophicated and intermediate eutrophicated areas, the average annual biomass ( $\text{g m}^{-2}$ ) of each is given. For the eutrophicated area, the average biomass ( $\text{g m}^{-2}$ ) of each group before and after the algae crash is given.

Source : Jørgensen et autres, 2007

Ce tableau nous présente, au sein du même estuaire, une estimation des communautés benthiques et de leur biomasse (moyenne annuelle) en  $\text{g.m}^{-2}$  (ou  $\text{g.m}^{-2}$ ), pour quatre zones représentatives des différents gradients d'eutrophisation (niveaux de santé) de l'écosystème : (a) zone vivante non eutrophiée (b) zone d'eutrophisation intermédiaire (c) zone eutrophiée avant crash d'algues (quasi mort de l'écosystème) (d) zone eutrophiée après un crash d'algues (lente reprise de l'écosystème).

On notera sur ce tableau que les biomasses principales sont constituées de zostères marines (*Z. noltii*) ou d'algues vertes (*Enteromorpha*). La zostère requiert une eau claire et ses exigences de luminosité minimale sont élevées. Elle contribue grandement à la structure physique et à la chaîne alimentaire du milieu marin. Les prés de zostères sont parmi les écosystèmes marins les plus riches au monde, mais aussi les plus menacés de disparition car la zostère est intolérante à des conditions anoxiques et eutrophes (algues vertes notamment).

Ces deux espèces sont ainsi très significatives du niveau de santé des écosystèmes marins.

### 3.4.2.2 Obtention des facteurs $\beta$ et de l'exergie CHL-GPL des organismes

Ni le tableau 21, ni l'ouvrage lui-même ne nous donnent les facteurs  $\beta$  retenus par l'équipe de Jørgensen pour chacune des différentes espèces. Nous les avons recomposés le plus précisément possible à partir des différentes sources disponibles (Jørgensen et autres, 2004; Jørgensen, 2006; Silow, Mokry et Jørgensen, 2011; etc.).

On les trouvera recomposés dans le tableau suivant. Quoiqu'il puisse y avoir de faibles différences entre les facteurs recomposés et les facteurs effectivement retenus lors de ces expérimentations, nous pourrions constater, en les comparant avec les niveaux d'exergie CHL et GPL, que cela aura une très faible incidence sur nos résultats finaux.

Tableau 22 (figure 64) : Recomposition des facteurs  $\beta$  et de l'éco-exergie des organismes de l'écosystème

Espèces	Nom commun	Facteur $\beta$	Exergie espèces en équivalents détritrus* (KJ.g-1)
<i>Enteromorpha + Ulva</i>	Algues vertes	20	6,70
<i>Other macroalgae</i>	Autres macroalgues	50	16,76
<i>Z. noltii</i>	Plantes à fleur marine, varech, zostères	393	131,72
<i>Anthozoa</i>	Coraux et anémones marines	91	30,50
<i>Sipunculia</i>	Vers marins non segmentés	100	33,52
<i>Nemertinea</i>	Moules, ...	76	25,47
<i>Oligochaeta</i>	Vers de terre (de mer)	130	43,57
<i>Polychaeta</i>	Vers annélides	50	16,76
<i>Mollusca</i>	Mollusques	605	202,77
<i>Crustacea</i>	Crustacés	230	77,09
<i>Insecta</i>	Insectes	70	23,46
<i>Echinodermata</i>	Etoiles de mer, ...	360	120,64
<i>Pisces</i>	Poissons	800	268,13

\* Les facteurs  $\beta$  ont été multipliés par une constante, pour donner une "exergie-équivalent-détritrus" (environnement de référence) de chaque espèce en KJ.g-1 (Silow, Mokry et Jørgensen, 2011).

Source : Divers sources Jørgensen et partenaires

Voici maintenant le même tableau avec l'exergie CHL-GPL de ces organismes (quelques valeurs étaient déjà visibles dans nos tableaux 19 et 20). Comme nous l'avons précisé antérieurement, nous avons recomposé ces niveaux d'exergie en croisant de nombreuses sources, généralistes ou spécialisées (exergie de l'algue verte par exemple), avec la base de données « Cliqual » (2012).

Notons que cette exergie est estimée à l'état « humide » des organismes, ce qui n'est pas courant dans la littérature. Mais la propension systématique des organismes, notamment les autotrophes, à éliminer l'humidité (exemple de la lignine et de l'huile) apparaît comme un critère fondamental caractérisant la directionnalité de réduction et d'oxydation.

Tableau 23 (figure 65) : Exergie-CHL et GPL des organismes

Espèces	Nom commun	Exergie (KJ.g-1 humide)*	
		CHL	GPL
<i>Enteromorpha + Ulva</i>	Algues vertes	0,654	0,361
<i>Other macroalgae</i>	Autres macroalgues	0,654	0,546
<i>Z. noltii</i>	Plantes à fleur marine, varech, zostères	2,068	3,344
<i>Anthozoa</i>	Coraux et anémones marines	...	2,907
<i>Sipunculia</i>	Vers marins non segmentés	...	3,775
<i>Nemertinea</i>	Moules, ...	...	3,979
<i>Oligochaeta</i>	Vers de terre (de mer)	...	4,234
<i>Polychaeta</i>	Vers annélides	...	4,347
<i>Mollusca</i>	Mollusques	...	3,918
<i>Crustacea</i>	Crustacés	...	4,137
<i>Insecta</i>	Insectes	...	4,300
<i>Echinodermata</i>	Etoiles de mer, ...	...	...
<i>Pisces</i>	Poissons	...	5,798

Source : Divers sources, généralistes ou spécialisées

Les niveaux d'exergie des tableaux 22 et 23, une fois rapportés aux biomasses organiques (en g.m<sup>-2</sup>) des quatre zones d'eutrophisation progressive du tableau 21, nous donnent les deux tableaux suivants, mesurant l'éco-exergie et l'exergie CHL-GPL de ces masses organiques (en KJ.m<sup>-2</sup>). Ces tableaux sont suivis de l'indice  $\bar{K}_a$  obtenu pour chaque placette ainsi que de différents ratios spécifiques.

### 3.4.2.3 Mesure de la diversité totale : Comparaison de l'Eco-exergie et de l'exergie CHL-GPL de l'écosystème

#### A - Mesure de l'écosystème fondée sur les facteurs $\beta$

Tableau 24 (figure 66) : A - Eco-exergie (facteur  $\beta$ ) des placettes de l'écosystème

Mesure énergétique et informationnelle de l'écosystème de Mondego (Portugal) sur la base des facteur $\beta$ (Jørgensen)		1		2		3		4	
		Zone non eutrophiée		Zone d'eutrophisation intermédiaire		Zone eutrophiée avant crash d'algues		Zone eutrophiée après crash d'algues	
Eco-exergie totale en KJ.m <sup>-2</sup>		41.881		3.202		9.374		2.974	
Eco-exergie / espèce en KJ.g <sup>-1</sup>		g.m <sup>-2</sup>		g.m <sup>-2</sup>		g.m <sup>-2</sup>		g.m <sup>-2</sup>	
Enteromorpha + Ulva	6,70	2,099	14,07	28,211	189,10	264,642	1.773,95	1,273	8,53
Other macroalgae	16,76	16,141	270,49	2,138	35,83	6,152	103,10	0,165	2,77
Z. noltii (total)	131,72	216,343	28.496,24	0,000	0,00	0,000	0,00	0,000	0,00
Anthozoa	30,50	0,003	0,09	0,000	0,00	0,000	0,00	0,000	0,00
Sipunculia	33,52	0,001	0,03	0,001	0,03	0,001	0,03	0,002	0,07
Nemertinea	25,47	0,005	0,13	0,003	0,08	0,005	0,13	0,001	0,03
Oligochaeta	43,57	0,128	5,58	0,031	1,35	0,010	0,44	0,002	0,09
Polychaeta	16,76	1,254	21,01	0,709	11,88	0,569	9,54	0,846	14,18
Mollusca	202,77	63,950	12.967,26	14,192	2.877,74	31,195	6.325,47	13,240	2.684,70
Crustacea	77,09	1,372	105,76	1,088	83,87	14,945	1.152,06	3,419	263,56
Insecta	23,46	0,007	0,16	0,006	0,14	0,009	0,21	0,001	0,02
Echinodermata	0,00	0,000	0,00	0,000	0,00	0,000	0,00	0,000	0,00
Pisces	268,13	0,000	0,00	0,006	1,61	0,034	9,12	0,000	0,00
Masse totale en g.m <sup>-2</sup>		301,303		46,385		317,562		18,949	
Indice $\bar{K}_a$		0,515		0,791		0,452		0,801	
Eco-exergie massique **		139,00		69,02		29,52		156,94	
		* $H' = - \sum p_i \log p_i$		** Eco-exergie totale ramenée au gramme					
<b>Coefficients de corrélation des variations entre valeurs et indicateurs</b>									
1 - Entre eco-exergie totale et eco-exergie massique :				0,3372					
2 - Entre Indice $\bar{K}_a$ et eco-exergie totale :				-0,5921					
3 - Entre Indice $\bar{K}_a$ et eco-exergie massique :				0,3935					
4 - Entre Indice $\bar{K}_a$ et Hétérogénéité (entropie $H'$ de Shannon) :				-0,8767					
5 - Entre entropie de Shannon ( $H'$ ) et eco-exergie totale :				0,1722					
6 - Entre entropie de Shannon ( $H'$ ) et eco-exergie massique :				-0,7757					

#### Commentaires :

- La corrélation entre éco-exergie totale (variation spatiale de l'exergie) et éco-exergie massique (éco-exergie totale divisée par la masse de biomasse / m<sup>2</sup> de placette), soit 0,337, est moins bonne que dans la publication citée (Jørgensen et autres, 2007, chap. 9), ou elle atteint 0,59. Cela suppose que le « rapport différentiel » de nos facteurs  $\beta$  « recomposés » soit moins bon que l'original. L'indice  $\bar{K}_a$  se révélant à l'usage « extrêmement sensible » aux faibles « variations de différentiel », il serait donc utile de refaire ce tableau avec les bons facteurs, quoique cela ne changera pas le sens des constats essentiels, une fois ce tableau comparé avec le suivant.

- La corrélation entre éco-exergie totale et indice  $K_a$  est négative. Cela suggère que le concept de facteur  $\beta$  n'est pas compatible avec celui de « distance à l'équilibre », tel que nous l'avons développé. Nous le vérifierons avec le tableau suivant.

- La corrélation entre éco-exergie massique et indice  $K_a$  est déjà bien meilleure. Quoique la biomasse totale (biodiversité totale) soit un indice évident de performance de la biodiversité, cette biodiversité une fois ramenée au gramme, et devenue « structurale » est plutôt significative de la « richesse en espèces ». Cela nous montrerait que cette richesse « mesurée » en espèces est un bon reflet de l'état d'eutrophisation des placettes.

- La corrélation entre indice  $K_a$  et entropie de Shannon est très largement négative. C'est une première vérification que l'un et l'autre vont dans des sens « radicalement contraires ».

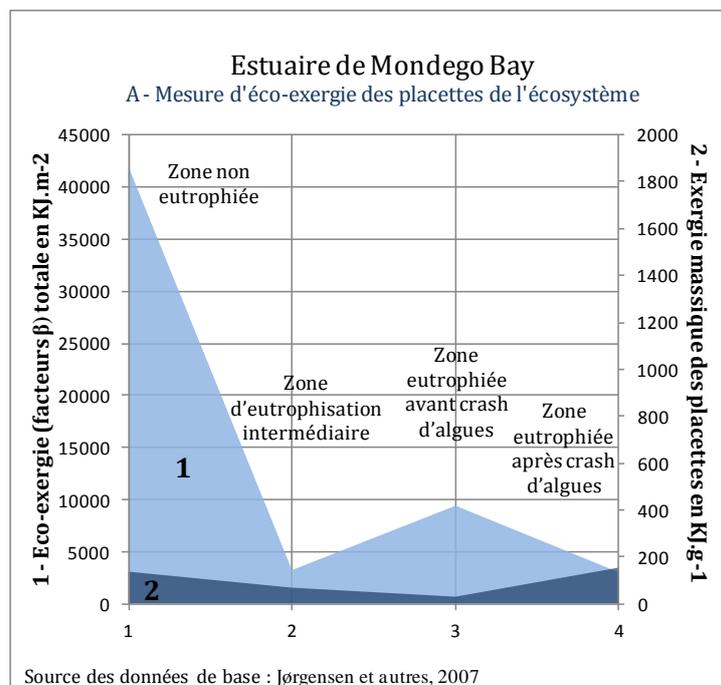
- Pas de commentaire à ce stade sur la corrélation entre éco-exergie totale et entropie de Shannon. Elle n'est pas significative.

- La corrélation entre éco-exergie massique et entropie de Shannon est elle aussi très négative. Ce qui confirme amplement les résultats négatifs de Jørgensen (Jørgensen et autres, 2007, chap. 9), quand il a voulu vérifier la validité de ses mesures d'éco-exergie en utilisant l'hétérogénéité (entropie) de Shannon. Et que cette dernière mesure bien plutôt un niveau d'homogénéité que d'hétérogénéité.

Ceci représente une première vérification de nos commentaires du paragraphe 2.4.1., selon lesquels l'entropie de Shannon ne saurait en aucun cas mesurer une « entropie négative », et donc le vivant, au sens de son concept « physique » mesuré sur le terrain.

Complétons ceci par un graphique illustrant les variations d'éco-exergie totale et massique (ou éco-exergie structurale) au long des gradients d'eutrophisation de l'écosystème.

Figure 67 : A - Variation de l'éco-exergie totale et massique (facteurs  $\beta$ ) de l'écosystème



**Commentaire :** L'exergie totale comparée avec l'exergie massique nous indique leur très forte baisse conjointe entre les placettes 1 et 2, et une forte remontée de l'exergie

totale à la placette 3, avec une intensité énergétique moyenne au gramme cependant encore plus faible que les précédentes.

Ceci nous indique à la placette 3 un changement d'espèce, moins intensive en énergie massique, et donc moins évoluée (direction de l'évolution), qui a envahi de sa masse l'écosystème, et qui serait la cause de l'eutrophisation.

La placette 4 indique quant à elle un nouveau changement, vers une espèce plus évoluée, mais avec une très faible masse totale.

## B - Mesure de l'écosystème fondée sur l'exergie CHL-GPL

Tableau 25 (figure 68) : B - Exergie CHL-GPL des placettes de l'écosystème

Mesure énergétique et informationnelle de l'écosystème de Mondego (Portugal) sur la base de l'exergie CHL-GPL		1		2		3		4	
		Zone non eutrophiée		Zone d'eutrophisation intermédiaire		Zone eutrophiée avant crash d'algues		Zone eutrophiée après crash d'algues	
Exergie totale en KJ.m-2		1.455		95		463		71	
Exergie CHL-GPL / espèce en KJ.g-1		g.m-2		g.m-2		g.m-2		g.m-2	
Enteromorpha + Ulva	1,02	2,099	2,13	28,211	28,63	264,642	268,61	1,273	1,29
Other macroalgae	1,20	16,141	19,37	2,138	2,57	6,152	7,38	0,165	0,20
Z. noltii (total)	5,41	216,343	1.170,85	0,000	0,00	0,000	0,00	0,000	0,00
Anthozoa	2,91	0,003	0,01	0,000	0,00	0,000	0,00	0,000	0,00
Sipunculia	3,78	0,001	0,00	0,001	0,00	0,001	0,00	0,002	0,01
Nemertinea	3,98	0,005	0,02	0,003	0,01	0,005	0,02	0,001	0,00
Oligochaeta	4,23	0,128	0,54	0,031	0,13	0,010	0,04	0,002	0,01
Polychaeta	4,35	1,254	5,45	0,709	3,08	0,569	2,47	0,846	3,68
Mollusca	3,92	63,950	250,56	14,192	55,60	31,195	122,22	13,240	51,87
Crustacea	4,14	1,372	5,68	1,088	4,50	14,945	61,83	3,419	14,14
Insecta	4,30	0,007	0,03	0,006	0,03	0,009	0,04	0,001	0,00
Echinodermata	...	0,000	0,00	0,000	0,00	0,000	0,00	0,000	0,00
Pisces	5,80	0,000	0,00	0,006	0,03	0,034	0,20	0,000	0,00
Masse totale en g.m-2		301,303		46,385		317,562		18,949	
Indice Ka		0,646		0,379		0,361		0,520	
Hétérogénéité (entropie de Shannon) *		0,257		0,453		0,450		0,346	
Exergie massique **		4,83		2,04		1,46		3,76	
		* $H' = - \sum p_i \log p_i$		** Exergie totale ramenée au gramme					
<b>Coefficients de corrélation des variations entre valeurs et indicateurs</b>									
1 - Entre exergie totale et exergie massique :				0,6189					
2 - Entre Indice Ka et exergie totale :				0,7202					
3 - Entre Indice Ka et exergie massique :				0,9896					
4 - Entre Indice Ka et Hétérogénéité (entropie H' de Shannon) :				-0,9974					
5 - Entre entropie de Shannon (H') et exergie totale :				-0,7400					
6 - Entre entropie de Shannon (H') et exergie massique :				-0,9797					

### Commentaires :

Ce nouveau tableau se prête maintenant à plusieurs autres commentaires, fondamentaux pour la suite de notre thèse.

- La corrélation entre exergie totale et massique est correcte. Elle est meilleure que celle obtenue par Jørgensen avec les facteurs  $\beta$  originaux (0,59). C'est un premier indice du fait que l'exergie CHL-GPL reflète « correctement » l'état énergétique de l'écosystème au long de ses gradients d'eutrophisation. Et ceci quand bien même, pour certaines des espèces présentes, la mesure de leur exergie CHL-GPL, à l'exemple des vers

annélides et des crustacés, fut estimée empiriquement. Nous y gagnerions donc probablement beaucoup à avoir de telles mesures à partir de standards performants. Notons à ce propos que ces mesures en exergie CHL-GPL ont l'avantage évident de ne varier que de manière infime à l'intérieur d'une même espèce, et de n'être que le prorata de la masse des organismes. Des mesures standards précises donneraient des résultats beaucoup plus constants et comparables.

- La corrélation entre indice  $K_a$  et exergie totale est meilleure, quand elle était négative avec l'éco-exergie. Cela suppose une première vérification de la compatibilité entre le concept d'exergie d'un écosystème mesuré par l'exergie CHL-GPL et la « distance à l'équilibre » de cet écosystème.

- La corrélation entre indice  $K_a$  et exergie massique est excellente. L'exergie massique étant significative de la richesse en espèces, l'exergie CHL-GPL nous en fournirait un excellent « reflet » ; mais à ce stade sans que puissions identifier les espèces.

L'indice  $K_a$  serait ainsi tout aussi bien applicable à une molécule qu'à un ensemble d'organismes.

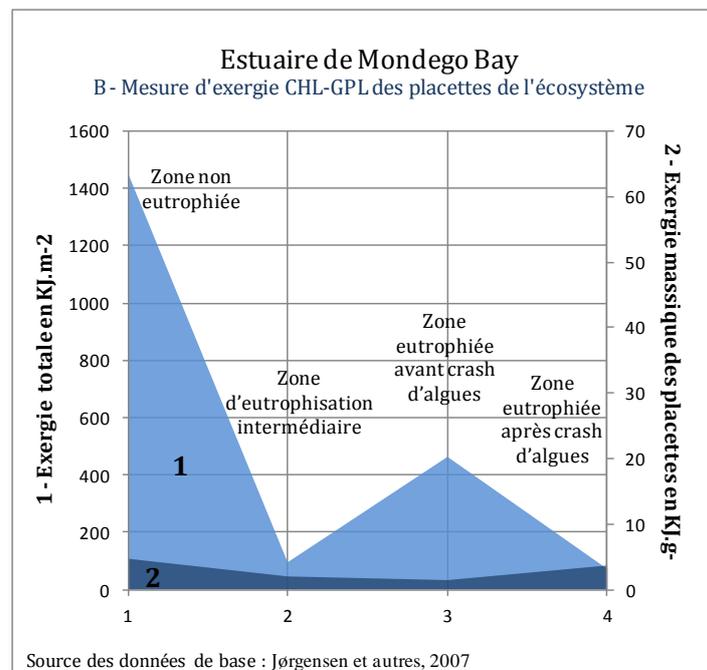
- La corrélation entre indice  $K_a$  et entropie de Shannon est encore plus négative que dans le tableau A.

Ce qui nous confirme que l'Hétérogénéité (de Shannon) ne saurait s'appliquer à la mesure d'une quelconque « distance à l'équilibre » du vivant.

Ce qui se vérifie avec les corrélations suivantes (n° 5 et 6), où l'entropie de Shannon va à contresens de l'évolution de l'exergie, et donc de sa directionnalité. Notons enfin que, quitte à inverser le sens de l'entropie de Shannon, l'indice  $K_a$  reste meilleur (0,9896 contre 0,9797).

Illustrons maintenant les évolutions de l'exergie totale et massique des placettes.

Figure 69 : B - Variations de l'exergie totale et massique (CHL-GPL) de l'écosystème



**Commentaires :** Nous avons respecté, entre ce graphique (B) et le précédent (A), la même proportion d'échelle entre exergie totale et exergie massique.

Cela nous permet de les comparer et de constater la grande similitude de tendance de leurs variations, et donc de faire la même interprétation, le graphique B étant moins contrasté quant à l'exergie massique spécifique de la (ou des) espèce(s) moins évoluée(s) qui a envahi l'écosystème (placette 3), et plus contrasté quant à sa masse.

Mais ils reflètent dans tous les cas une même signification et une même « utilité » !

L'exergie CHL-GPL aurait ainsi une même vocation que les facteurs  $\beta$  à caractériser l'exergie spécifique d'un organisme et d'un écosystème.

Quoique d'un usage grandement facilité et techniquement plus consensuel.

L'exergie massique (ou structurale), qui dans les deux cas nous donnait une interprétation de l'évolution des placettes, serait-elle dès lors suffisante à refléter la variation de distance à l'équilibre d'un écosystème, et à caractériser son niveau d'exergie *biogéochimique* ?

Nous y répondrons dans un deuxième temps.

### C - Mise en évidence d'une directionalité redox

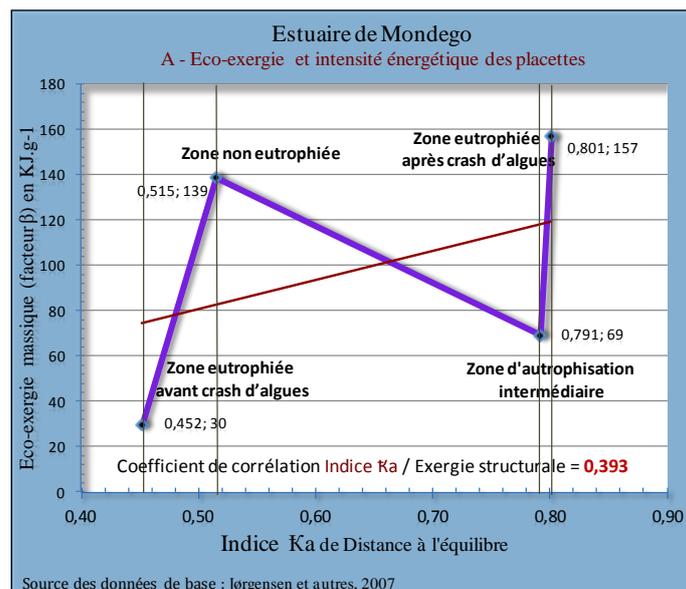
Un de nos objectifs de cette section était d'étudier les changements d'échelle entre molécules et organismes, et la directionalité redox de l'intensité énergétique pour un ensemble d'organismes ou écosystème.

Est-ce que l'utilisation de l'exergie CHL-GPL nous permet de la mettre en évidence ? Et qu'en est-il des facteurs  $\beta$  ?

Regardons maintenant, pour nos deux systèmes de mesure, et à l'exemple des graphes des figures 43 et 47, la courbe de tendance des évolutions de l'exergie massique et de l'indice  $K_a$  pour les 4 placettes de l'écosystème.

Nous avons classé, tant que faire se pouvait, les placettes par niveau d'intensité croissante de l'exergie et de l'indice  $K_a$ .

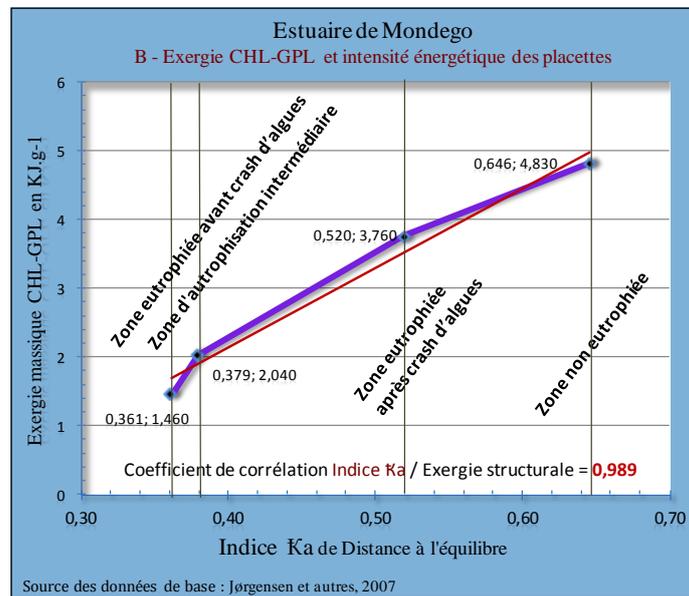
Figure 70 : A - Variations de l'éco-exergie massique (facteur  $\beta$ ) et de l'indice  $K_a$  des placettes



Ce graphique montre que les facteurs  $\beta$ , tout du moins tels que nous les avons « recomposés », ne permettent pas de mettre en évidence une directionalité.

Cela proviendrait d'une variation non homogène des facteurs  $\beta$  au long du gradient d'évolution des espèces et de leur biodiversité.

Figure 71 : B - Variations de l'exergie massique (CHL-GPL) et de l'indice  $K_a$  des placettes



Dans nos calculs du tableau 25, nous avons sommé les CHL et les GPL, obtenant une énergie cumulée que nous pouvons nommer « exergie redox ».

Le graphique B met ainsi en évidence une directionnalité continue d'intensification énergétique redox des organismes et écosystèmes, corrélée avec leur diversité différentielle.

Ce qui vérifierait une directionnalité commune entre niveau d'exergie (CHL-GPL), niveau de biodiversité, et distance à l'équilibre thermodynamique ( $D_{ET}$ ) d'un écosystème.

Le cumul redox CHL-GPL étant assimilable à  $G_B + TS$ , cela vérifierait par ailleurs notre hypothèse d'une fonction d'état des écosystèmes (paragraphe 2.5.2, formules (37) et (38)) selon laquelle entropie négative « et » entropie positive (traduites en pression et volume) participent conjointement à la production de la distance à l'équilibre thermodynamique.

### D - Synthèse comparative de l'éco-exergie et de l'exergie CHL-GPL

La comparaison des évolutions du niveau d'exergie totale de chaque placette nous montrait que la tendance générale, que ce soit avec les facteurs  $\beta$  ou avec l'exergie CHL-GPL, allait dans le même sens.

Ceci reflétait une signification commune, mettant en avant une exergie CHL-GPL qui aurait une même vocation que les facteurs  $\beta$  à caractériser le niveau d'exergie, totale ou massique, d'un organisme et d'un écosystème.

Cette aptitude fonctionnelle de l'exergie CHL-GPL nous est confirmée par la bonne corrélation des exergies totales et massiques obtenues selon l'une et l'autre méthode (données tirées des tableaux 24 et 25).

Tableau 26 (figure 72) : Corrélation éco-exergie et exergie CHL-GPL

Zones	Exergie totale en KJ.m-2		Exergie massique en KJ.g-1	
	Eco-exergie	Exergie CHL-GPL	Eco-exergie	Exergie CHL-GPL
1	41.881	1.455	139,00	4,830
2	3.202	95	69,02	2,040
3	9.374	463	29,52	1,460
4	2.974	71	156,94	3,760
	Coeff. r de corrélation		Coeff. r de corrélation	
	<b>0,99276</b>		<b>0,91129</b>	

Arrivés à ce stade de nos comparaisons et de leurs capacités réciproques, se repose maintenant la question de l'interprétation et du diagnostic vital de l'écosystème.

L'exergie massique (ou structurale), qui dans les deux cas nous donnait une première interprétation de l'évolution des placettes, était-elle suffisante à refléter la variation de distance à l'équilibre d'un écosystème, et à caractériser son niveau d'exergie *biogéochimique* ?

Dans les deux cas, elle ne nous dit rien des processus de réduction et d'oxydation de l'Ecosphère, qui s'avèrent comme une dimension incontournable des fonctions du vivant.

La question est de savoir quel rôle relatif ces deux processus, une fois clairement « distingués », peuvent chacun jouer dans la production d'exergie *biogéochimique*, la distance totale à l'équilibre et la santé globale d'un écosystème.

Cette différence réduction-oxydation s'avérera fondamentale quand, passant d'un mini-écosystème à un macro-écosystème, nous devons mettre en rapport, par exemple, la biodiversité d'une forêt centenaire avec celle d'une zone humide, d'une jeune prairie ou d'une culture céréalière. Tout comme nous pourrions mettre en rapport, pour un macro-écosystème de l'hydrosphère, la biodiversité du phytoplancton autotrophe avec celle de la chaîne hétérotrophe.

Or les facteurs  $\beta$  et l'éco-exergie ne rendent pas compte de cette différence.

Ils ne gèrent que l'exergie totale et l'exergie massique (cette dernière étant vue comme exergie structurale).

Nous ne pourrions donc mener plus loin notre comparaison avec les facteurs  $\beta$ , et y mettront donc fin, pour aller maintenant plus loin dans l'étude de la fonctionnalité redox, et son rapport potentiel avec la santé d'un écosystème.

En nous fondant toujours sur les données en grandeur réelle de l'estuaire de Mondego, mais en ne nous basant désormais que sur l'exergie CHL-GPL, qui a montré sa capacité à refléter l'exergie des organismes et d'un écosystème.

#### 3.4.2.4 Mesure des diversités structurales « et » fonctionnelles : Exergie *biogéochimique* et $D_{ET}$ de l'écosystème

##### Distinguer la réduction de l'oxydation

Le tableau 25 nous donnait la mesure des placettes de l'écosystème en exergie combinée CHL et GPL, soit l'exergie redox sans distinction.

Le tableau suivant nous donne maintenant leur seule mesure en exergie CHL (exergie de réduction).

Tableau 27 (figure 73) : Exergie CHL (réduction) des placettes de l'écosystème

Mesure énergétique de l'écosystème de Mondego (Portugal) sur la base de l'exergie CHL (réduction)		1		2		3		4	
		Zone non eutrophiée		Zone d'eutrophisation intermédiaire		Zone eutrophiée avant crash d'algues		Zone eutrophiée après crash d'algues	
Exergie totale de réduction en KJ.m-2		462,33		20,25		178,24		0,97	
Exergie CHL / espèces en KJ.g-1		g.m-2		g.m-2		g.m-2		g.m-2	
Enteromorpha + Ulva	0,654	2,099	1,37	28,211	18,45	264,642	173,08	1,273	0,83
Other macroalgae	0,840	16,141	13,56	2,138	1,80	6,152	5,17	0,165	0,14
Z. noltii (total)	2,068	216,343	447,40	0,000	0,00	0,000	0,00	0,000	0,00
Anthozoa	...	0,003	...	0,000	...	0,000	...	0,000	...
Sipunculia	...	0,001	...	0,001	...	0,001	...	0,002	...
Nemertinea	...	0,005	...	0,003	...	0,005	...	0,001	...
Oligochaeta	...	0,128	...	0,031	...	0,010	...	0,002	...
Polychaeta	...	1,254	...	0,709	...	0,569	...	0,846	...
Mollusca	...	63,950	...	14,192	...	31,195	...	13,240	...
Crustacea	...	1,372	...	1,088	...	14,945	...	3,419	...
Insecta	...	0,007	...	0,006	...	0,009	...	0,001	...
Echinodermata	...	0,000	...	0,000	...	0,000	...	0,000	...
Pisces	...	0,000	...	0,006	...	0,034	...	0,000	...
Masse totale en g.m-2		301,303		46,385		317,562		18,949	
Indice Ka		0,906		0,677		0,887		0,511	
Exergie massique de réduction (KJ.g-1) **		1,53		0,44		0,56		0,05	

\*\* Exergie totale ramenée au gramme

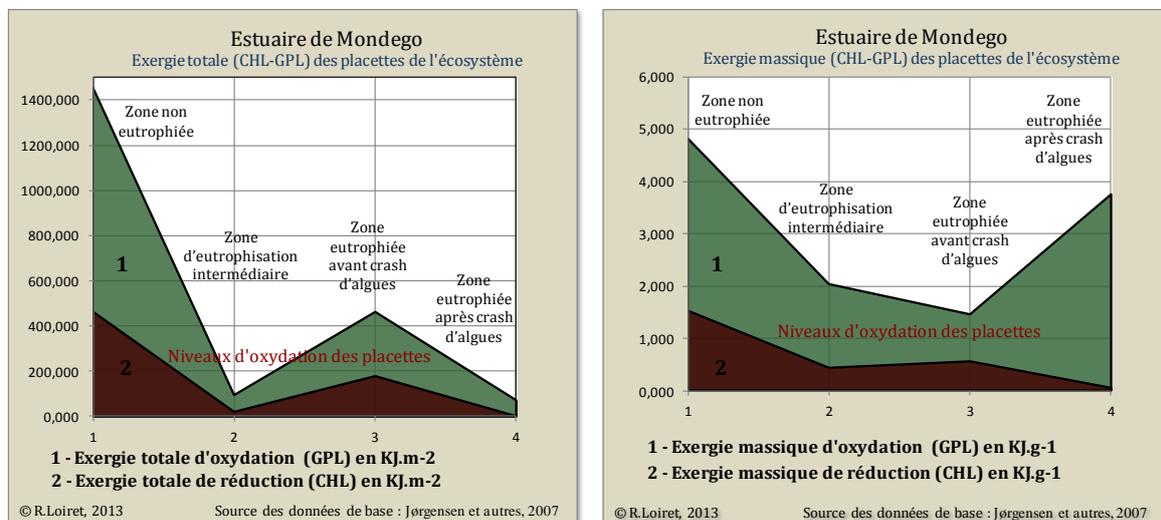
Ce tableau met en évidence l'intervention essentielle des algues vertes et des zostères dans les processus de réduction de l'écosystème au long de son évolution.

Mais en quoi précisément cette réduction intervient-elle dans son rapport à l'oxydation, et dans leur rapport réciproque aux espèces, au long des gradients d'eutrophisation ? La santé de tous les écosystèmes se résumerait presque à cette question, à laquelle nous allons chercher certaines réponses en établissant la distinction réduction/oxydation des placettes et en l'analysant au long des gradients.

Pour obtenir l'exergie d'oxydation de l'écosystème, tout comme nous soustrairons la diversité *structurale* de la diversité *biologique* d'un écosystème pour obtenir sa diversité *fonctionnelle*, nous soustrairons les valeurs (de réduction) de chaque poste du tableau 27 des valeurs redox des mêmes postes du tableau 25. Il n'y a aucun autre moyen abordable de l'obtenir.

Nous pouvons alors faire apparaître le rapport des deux exergies.

Figure 74 : Exergies totales et massiques, de réduction et d'oxydation, des placettes de l'écosystème



### Commentaires :

Là où la figure 69 montrait les variations d'exergie totale et massique, la figure 74 présente ces mêmes variations en séparant exergie de réduction et exergie d'oxydation. Ce qui établit en quelque sorte un « zoom » sur la figure 69, en positionnant à gauche l'exergie totale et à droite l'exergie massique, et en distinguant pour chaque graphique l'oxydation et la réduction de l'écosystème.

Une première interprétation serait à gauche que l'oxydation tient un rôle très peu explicite pour les placettes 2, 3 et 4, si ce n'est très contradictoire quand on considère que l'eutrophisation est assimilée à un étouffement.

L'exergie massique à droite éclaire mieux le phénomène d'eutrophisation que le graphique 69, avec des tendances beaucoup plus marquées qui nous montrent, pour la placette 3 notamment, que s'il y avait retour de l'oxydation, c'était du fait de la masse totale, alors qu'à l'échelle de l'organisme, elle était la plus faible de toutes les placettes.

Mais l'oxydation massique de la placette n°3, à la limite du crash, reste à droite étonnement supérieure à la réduction. La variation maximale d'exergie massique est environ de 1 à 3. Comment savoir de quel type d'espèce(s) est composé le milieu sans avoir une indication de pression ou de volume interne de l'écosystème ? Il y a eu certes évolution à la baisse dans la placette 3, mais pour être remplacée par quelle espèce exactement ? Si nous n'avions la table des espèces, rien ne nous indiquerait la différence, pour une même exergie massique, entre des algues vertes de grand volume, et des organismes de faible volume à forte densité énergétique.

### Introduire la conjugaison pV.m

Prenons comme référence le nouveau tableau ci-dessous :

Tableau 28 (figure 75) : Synthèse de l'exergie CHL-GPL et  $D_{ET}$

Estuaire de Mondego (Portugal) Mesure de l'exergie CHL-GPL Données de synthèse Source des données de base : Jørgensen et autres, 2007			1	2	3	4
		Unités	Zone non eutrophiée	Zone d'eutrophisation intermédiaire	Zone eutrophiée avant crash d'algues	Zone eutrophiée après crash d'algues
Masse totale		g.m-2	<b>301,30</b>	<b>46,39</b>	<b>317,56</b>	<b>18,95</b>
<b>A -Redox</b>						
Exergie totale redox	KJ.m-2	1.454,64	94,59	462,82	71,21	
Exergie massique redox *	KJ.g-1	4,83	2,04	1,46	3,76	
Indice Ka (redox)	m (mètre)	0,65	0,38	0,36	0,52	
Distance à l'équilibre thermodynamique (DET)	KJm .m-2	939,01	35,86	166,98	37,01	
DET massique *	KJm .g-1	3,12	0,77	0,53	1,95	
<b>B -Réduction</b>						
Exergie totale de réduction	KJ.m-2	462,33	20,25	178,24	0,97	
Exergie massique de réduction *	KJ.g-1	1,53	0,44	0,56	0,05	
Indice Ka (réduction)	m (mètre)	0,91	0,68	0,89	0,51	
Distance à l'équilibre de réduction (DER)	KJm .m-2	418,86	13,70	158,17	0,50	
DER massique *	KJm .g-1	1,39	0,30	0,50	0,03	
<b>C - Oxydation (A-B)</b>						
Exergie totale d'oxydation	KJ.m-2	992,31	74,35	284,58	70,24	
Exergie massique d'oxydation	KJ.g-1	3,30	1,60	0,90	3,71	
Distance à l'équilibre d'oxydation (DEO)	KJm .m-2	520,15	22,16	8,81	36,52	
DEO massique *	KJm .g-1	1,73	0,48	0,03	1,93	

\* Le précédent ramené au gramme

Ce tableau, qui établit la synthèse des tableaux 25 et 27, introduit la conjugaison  $pV.m$  de l'exergie totale et massique des différentes placettes avec leur indice  $Ka$ , et avec elle les distances à l'équilibre de réduction ( $D_{ER}$ ) et d'oxydation ( $D_{EO}$ ), qui ensemble mesurent la  $D_{ET}$ .

Mais la  $D_{EO}$  n'est pas obtenue directement, c'est la conjugaison des indices  $Ka$  redox et de réduction avec les exergies totales redox et de réduction, qui nous donne les  $D_{ET}$  et  $D_{ER}$ , puis la  $D_{EO}$  par différence entre les deux.

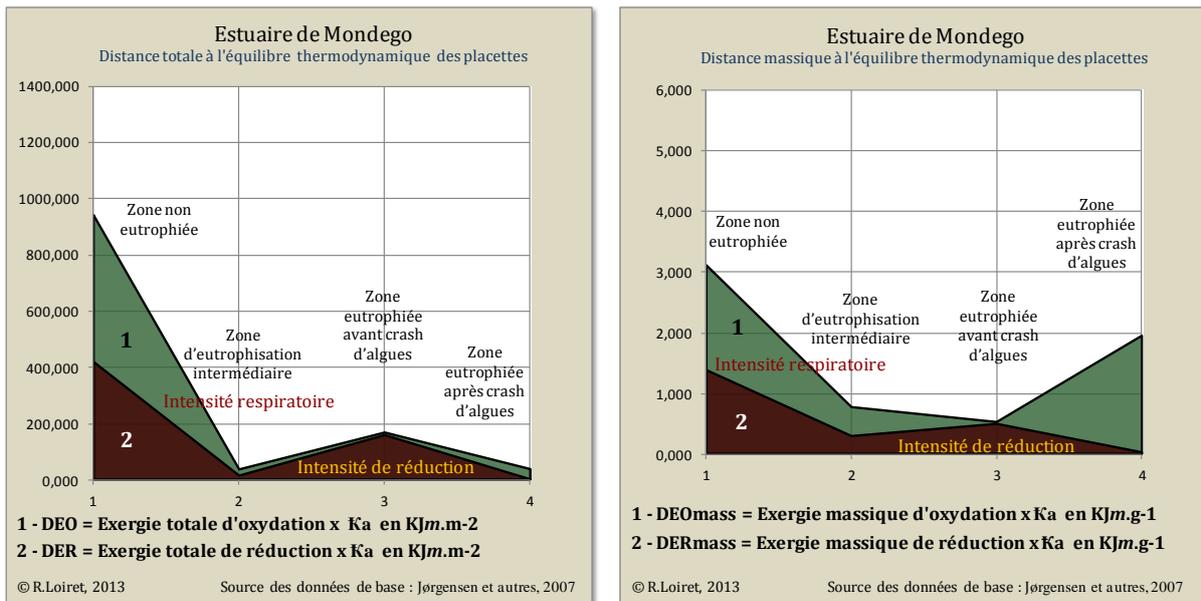
Les exergies de réduction et d'oxydation, qui vérifient la fonction d'état  $G_B + TS = pV$  (37), et sa variation  $d(pV)$  (38) (cf. figure 51), sont maintenant conjuguées avec leur indice  $Ka$  respectif, l'indice de diversité structurale, à réduction dominante et l'indice de diversité fonctionnelle, à oxydation dominante.

Elles acquièrent avec la  $D_{ER}$  et la  $D_{EO}$  la double propriété d'exprimer une énergie en même temps que sa diversité différentielle, qui va nous donner une nouvelle interprétation de l'évolution des placettes.

Ce par quoi nous allons pouvoir établir un diagnostic « vital » de l'écosystème.

### Etablir le diagnostic « vital » de l'écosystème

Figure 76 : Distance totale et massique à l'équilibre thermodynamique ( $D_{ET}$ ) des placettes



#### Remarque générale :

Le tableau de gauche est établi en  $KJm.m^{-2}$ , soit des joules.mètre rapportés à une surface, ceci alors que, comme nous le vérifierons à propos d'un territoire, le Joule.mètre, ou plus exactement la conjugaison  $pV.m$ , établit explicitement que nous avons à faire à une pression conjuguée à un volume, puis à une distance à l'équilibre statistique.

Ceci tend à nous montrer que toute mesure de la diversité biologique, et surtout pour les écosystèmes marins, devrait être établie en volume, et non en surface. Sinon, comment faire, non seulement avec le volume caractéristique des organismes vivants et/ou de leurs groupements, mais aussi avec les milieux très profonds, où plusieurs couches d'organismes peuvent se succéder ?

La pratique courante veut pourtant que ces mesures soient établies en rapport aux surfaces, et nous offre donc des données au prorata. Nous reviendrons sur ce sujet.

Le milieu du cas étudié faisant une très faible profondeur, le lecteur pourra cependant remplacer les  $\text{KJm.m}^{-2}$  par des  $\text{KJm.m}^{-3}$  (ce qui reviendrait à avoir la seule pression  $p \times$  par la distance  $m$  à l'équilibre statistique), les résultats globaux seront identiques.

### Commentaires :

Ces graphiques font maintenant apparaître les « intensités » respectives de respiration et de réduction des placettes.

Ils nous offrent une toute nouvelle lisibilité des gradients d'évolution des placettes et de leurs causes. Nous allons les analyser placette par placette.

**Placette n°1 :** C'est la pleine santé, avec un rapport redox très équilibré, total et massique. Quand l'oxydation semblait fortement dominer (figure 74), ce n'était que sur l'exergie en masse (stocks), et non sur le plan (thermo) dynamique, qui nous renseigne sur le niveau de diversité de cette exergie. Le système est bien vivant.

Un certain équilibre entre réduction et oxydation, que seules pourraient nous donner un ensemble d'études en grandeur réelle, serait ainsi à même d'entretenir la chaîne trophique de l'Ecosphère. Sachant que les proportions de cet équilibre doivent dépendre de chaque espèce d'autotrophe en elle-même, ainsi que des rapports entre autotrophes et hétérotrophes au sein de l'écosystème.

**Placette n°2 :** Nous observons pour les stocks (figure 74) une chute vertigineuse de l'exergie totale, tant d'oxydation que de réduction. Elle se vérifie et s'amplifie avec la distance à l'équilibre. La biomasse autotrophe a littéralement fondue, et les zostères notamment ont entièrement disparu ; et avec elles les capacités d'entretien de la chaîne trophique.

Cette tendance se vérifie avec l'exergie massique et sa distance à l'équilibre mais ne se comprend pas isolément.

**Placette n°3 :** Nous nous posons la question de l'évolution de la placette n°3 au vu de son exergie totale (figure 74), en réduction et oxydation.

Des espèces moins évoluées semblaient avoir remplacé celles de la placette 1, mais sans que nous puissions pour autant les différencier.

La  $D_{ER}$  et la  $D_{EO}$  (figure 76) ont pris le relai pour nous fournir désormais l'explication complète.

Entre les placettes 2 et 3, la distance totale et massique d'oxydation, soit l'intensité respiratoire, a continué à diminuer pour disparaître complètement, alors que la distance totale de réduction, son intensité, s'est fortement développée. Le rapport redox ayant disparu, c'est un signe que la biodiversité ne fonctionne plus, avec une masse de carbone qui ne respire plus par elle-même (comme respirent les arbres ou les zostères).

Or qu'est-ce qu'une masse organique qui ne respire plus ?, c'est une masse morte, qui va connaître un processus d'oxydation ou de réduction, certes, mais généré par des forces extérieures à elle-même (oxydation par les microorganismes puis subduction des parties non dégradables dans les couches profondes de la Biosphère).

Nous permettant de distinguer les masses vivantes de carbone réduit (par un processus endogène), des masses mortes de carbone en voie d'être oxydées (par un processus exogène), la distinction et la comparaison  $D_{EO}/D_{ER}$  nous permet ainsi de distinguer le vivant du mort !

Ce qui représente pour le moins un indicateur fondamental de santé !

Et ce qui nous mène finalement aux algues vertes. On sait la dépendance de ces algues (qui n'ont ni racines ni tronc) à l'azote libre, quand les zostères sont capables de le tirer du sol (réseau racinaire) au fur et à mesure de leurs besoins, pour le fournir ensuite (GPL) aux hétérotrophes de la chaîne.

Si elles exercent par là une évidente fonction de « nettoyage » de l'azote en excès, il n'en reste pas moins que par leur croissance très rapide et leur demande en oxygène probablement très supérieure à leur capacité de réduction, elles s'étouffent et meurent rapidement, formant des masses mortes de carbone en suspension avant de se déposer au fond de l'eau ; où elles sont décomposées/oxydées par les hétérotrophes, eux-mêmes très demandeurs en azote et oxygène, amplifiant ainsi le cycle négatif jusqu'à eutrophisation complète.

Ainsi, l'équilibre redox des exergies totales et massique (figure 74) était trompeur et seule la comparaison  $D_{EO}/D_{ER}$  nous aura permis de mettre le processus réel en évidence.

L'algue verte n'est pas une espèce autotrophe typique de l'Ecosphère, générant par elle même, sur le long terme, cet équilibre fonctionnel redox issu de l'endosymbiose au sein de sa propre masse vivante (réduction, stockage et oxydation endogène du carbone, comme les arbres ou les zostères) ; c'est une espèce participant des processus fonctionnels primitifs de l'Ecosphère (elle serait assimilable à un amas de protistes) où réduction et oxydation étaient encore distincts et/ou peu coordonnés, à l'exemple des tapis microbiens ; elle est très dépendante des facteurs extérieurs avec une croissance exponentielle et un besoin de lumière dépendant de leur disponibilité immédiate, impliquant que seule la couche supérieure du tapis reste vivante, quand le carbone de la masse morte inférieure va entrer très progressivement en subduction.

**Placette n°4 :** La comparaison  $D_{EO}/D_{ER}$  de l'exergie totale avec la placette 2 ne nous dit rien de significatif. Mais l'exergie massique a développé un contraste frappant des placettes 2, 3, et 4. Ici les masses de carbone eutrophié ont disparu pour être remplacées par une respiration complètement dominante, qui marque un redémarrage de la dissipation de la placette, quoiqu'avec une masse totale très faible et une capacité réductrice autotrophe (production d'oxygène) d'accumulation énergétique au prorata. Le crash d'algues a opéré une forme de nettoyage générale, et il est probable que le retour à la situation de la placette 1 demandera beaucoup de temps.

Nous arrêterons là notre étude appliquée de l'exergie CHL-GPL, de l'indice  $K_a$  et de la conjugaison pV.m pour un petit écosystème, mesurable à partir d'un ensemble d'organismes identifiés.

Notons seulement que nous avons aussi utilisé ces mêmes outils pour évaluer les fonctions redox et la distance à l'équilibre redox d'une communauté d'organismes de la macrofaune du sol, avec les mêmes résultats fonctionnels, indicateurs cette fois de fertilité biologique d'oxydation et de réduction des couches humiques du sol.

## 3.5 Conclusions du chapitre III et de la deuxième partie

### 3.5.1 Sur la recherche et ses résultats

Le chapitre III aura synthétisé le fonds d'une recherche de *nature* fondamentale, avec ses résultats, par laquelle nous avons voulu répondre à la seconde composante de notre problématique globale, en élaborant et proposant, en deux étapes, l'unité de compte d'un système de mesure rendant compte de la biodiversité structurale et fonctionnelle, aux diverses échelles où elle se présente.

- L'indice  $K_a$ , étant supposé mesurer la diversité structurale différentielle en partie de mètre, quelle que soit la forme ou l'échelle où elle se présente, en nous donnant sa distance à l'équilibre statistique ( $D_{ES}$ ),

- Sa conjugaison avec l'exergie  $pV$  ( $pV.m$ ), que l'on peut voir comme une énergie structurée par de l'information, étant supposée quant à elle mesurer la diversité fonctionnelle et biologique, et dans tous les cas en rendre compte, en nous donnant sa distance à l'équilibre thermodynamique ( $D_{ET}$ ).

Deux étapes au long desquelles nous aurons cherché à :

- Tester les capacités l'indice  $K_a$  à mesurer la diversité structurale, et vérifier ces capacités par diverses corrélations relatives à la mesure en exergie des molécules et organismes,

- Vérifier la pertinence de la conjugaison  $pV.m$ , en la testant comparativement aux résultats d'une étude, menée par S.E Jørgensen et ses partenaires, sur la mesure de la diversité biologique d'un petit écosystème marin, l'estuaire de Mondego, aux moyens de « facteurs  $\beta$  » et de l'éco-exergie. Etude qui aura servi de référence à la CBD (2010), pour constater l'état de la réflexion scientifique sur la mesure de la diversité biologique, et définir les objectifs nouveaux à atteindre, compte tenu des échecs relatifs rencontrés.

Et au bout desquelles il nous semble que les travaux exposés au long de ce chapitre auront connu des résultats satisfaisant nos objectifs, notamment :

- La mise au point d'une unité de compte de la biodiversité structurale et fonctionnelle,

- L'utilisation de l'indice  $K_a$  en lieu et place de l'indice  $H'$  de Shannon,

- La vérification des capacités de l'exergie CHL-GPL à « caractériser » les organismes et remplacer les facteurs  $\beta$ ,

- L'identification d'une directionnalité redox, et la distinction de l'exergie de réduction et d'oxydation, qui vérifie la fonction  $pV$  pour les stocks d'exergie (37),

- L'utilisation de la conjugaison  $pV.m$ ,

- La mesure de la  $D_{ER}$  et la  $D_{EO}$  pour « signifier » le type d'organismes et établir le diagnostic vital d'un écosystème par son niveau de biodiversité.

Une déduction importante que nous en tirerons est que dans ses dimensions réelles, notre application sur l'écosystème de Mondego a vérifié les constats de notre tableau 7 concernant l'exergie, avec les différences essentielles entre l'exergie massique et sa densité, massique ou énergétique.

L'exergie ( $pV$ ), rapportée à une masse ou une surface, et y compris multipliée par un facteur d'intensification propre aux espèces, si elle a permis de « caractériser » les placettes

de l'écosystème relativement à une variation d'exergie totale, ne permet pas de « signifier » le type d'espèces relativement à leur densité énergétique spécifique.

Et que ce soit l'éco-exergie des facteurs  $\beta$  ou l'exergie CHL-GPL, l'exergie en soi ne nous aurait pas permis, sauf à connaître les espèces d'avance, d'établir un diagnostic *vital* de l'écosystème.

Alors que la conjugaison  $pV.m$  (pour la réduction et l'oxydation) permettrait de caractériser l'exergie *biogéochimique*, avec les types d'espèces qui la produisent, et d'établir un tel diagnostic.

Cette conjugaison, qui nous donne une unité de mesure qui fut l'objet central de notre quête, aurait ainsi une signification, vis à vis notamment des recherches antérieures, que nous approfondirons maintenant, tant vis à vis de la question *écosystémique* (naturelle), que de la question *économique*.

### 3.5.2 Sur la signification *écosystémique* du Joule.mètre (J.m)

#### 3.5.2.1 De la tension surfacique à la tension volumique

Engels avait opposé à la théorie de Podolinsky qu'elle ne prenait pas en compte les transformations entropiques de l'économie, et que la dimension calorique de l'énergie et de sa production, comme expression biophysique des valeurs d'*usage* traditionnelles, était incommensurable à la production des valeurs d'*échange* de l'économie (moderne).

Un siècle plus tard, Odum (1971, ..., 1996), avec les SeJ et l'énergie, avait tout particulièrement recherché une nouvelle dimension d'expression, *qualitative*, de l'énergie des écosystèmes, qu'il pourrait mettre en rapport direct avec la création monétaire.

Et Jørgensen (1977,..., 2007), avec les facteurs Beta et l'éco-exergie, avait pour sa part exploré une voie, plus naturaliste, visant à mettre cette dimension qualitative de l'énergie des écosystèmes en rapport plus direct avec l'information du vivant et la biodiversité.

Concernant nos propositions, notre démonstration aura pour une grande part consisté à dire que cette dimension qualitative de l'énergie tant recherchée, était *déjà* présente en germe, depuis leur origine, dans les fondamentaux de la thermodynamique.

Avec notamment la fonction d'état enthalpie,  $H = pV + U$  (16), qui, en l'examinant d'un point de vue global, décrirait d'une part toute l'énergie du milieu naturel (Biosphère...), et de l'autre toute l'énergie de l'économie (Anthroposphère).

Au point que l'équation  $dH = d(pV) + dU = Cte$  (paragraphe 2.5.1.), pourrait représenter l'équation fondamentale du Bilan écologique, en complément de la fonction d'état des écosystèmes que nous avons proposée avec les formules (37) et (38).

Et cette dimension tant recherchée se résumerait pour partie au passage, pour l'énergétique des sciences naturelles (sauf les sciences de l'atmosphère et du climat pour lesquelles cela semble acquis) de la 2D à la 3D. C'est à dire à la transposition de leur pensée traditionnelle en surface, en une pensée en volume qui caractérise la thermodynamique appliquée aux systèmes industriels.

Ce qui, dans l'énergétique des écosystèmes, et relativement à «  $pV$  », introduit systématiquement la notion de pression.

Nous n'avons pas cherché à approfondir cette restriction apparente d'une énergétique de la nature rapportée aux seules surfaces.

Mais toujours est-il que quand Odum a conçus les *seJ* (Solar Equivalent Joules) comme un résumé des forces de travail planétaires intégré dans la mesure de l'énergie interne des matières organique, l'*émergie*, ceux-ci reflétaient une « intensité » énergétique, qu'il rapportait à la surface des écosystèmes étudiés, en  $\text{seJ}\cdot\text{m}^{-2}$  ; tout comme Jørgensen mesurait la biodiversité de l'écosystème de l'estuaire de Mondego (tableau 24) en  $\text{J}\cdot\text{m}^{-2}$ .

$\text{J}\cdot\text{m}^{-2}$  qui représentent comme nous l'avons vu une *tension surfacique*, puisqu'ils sont équivalents aux  $\text{N}\cdot\text{m}^{-1}$  (paragraphe 3.3.2.). Tension de surface qui s'avère propre à caractériser certains matériaux, mais pas la matière organique, sachant de toute manière qu'elle ne pourra jamais fonder une mesure commune aux compartiments thermodynamiques de la Biosphère.

C'est ainsi comme si Odum et Jørgensen avaient, pour des raisons qui nous échappent, tenté absolument de « concentrer », que ce soit toutes les forces de la nature, ou toute l'information de la biodiversité, sur une même surface, pour la rendre significative de celles-ci.

Presque au point de : *donner un volume* à une surface !

Quand il suffisait de passer au volume.

Si Odum y avait pensé, probablement aurait-il découvert avec surprise que la pression interne (tension volumique) de la matière organique (en  $\text{J}\cdot\text{m}^{-3}$ ), reflétait déjà dans ses divers états, d'une manière « naturelle », le travail que la Nature a incorporé dans sa production au long de millions de millénaires.

Ce par quoi nous postulons qu'il y aurait une relation directe entre émergie en  $\text{seJ}\cdot\text{m}^{-2}$ , et pression en  $\text{J}\cdot\text{m}^{-3}$ .

Nous n'inventons pas cette relation, et l'avons en partie vérifiée.

Dans leur étude, Siche et autres (2007), ont cherché à améliorer la « signification » (fertilité, ...) des facteurs d'équivalence (EQF) pris en compte par le GFN dans l'Ee pour calculer la *biocapacité* des surfaces productives en gha.

Ceci en intégrant vis à vis de la NPP (Net Primary Productivity - nous approfondirons cette notion dans nos calculs relatifs à l'Actif écologique), la *transformité* (facteur d'intensivité énergétique selon Odum) apportée par les *seJ*.

Etudions maintenant le tableau le plus représentatif de leurs résultats, sachant que les valeurs de transformité ( $\text{Tr}_{\text{NPP}}$  en  $\text{seJ}/\text{J}$ ) de ce tableau sont tirées des travaux fondamentaux d'Odum.

Tableau 29 (figure 77) : Facteurs d'équivalence exprimés en seJ/m<sup>2</sup>

Zones	NPP <sub>MASS</sub> <sup>(i)</sup> (g/m <sup>2</sup> /year)	NPP <sub>ENERGY</sub> <sup>(ii)</sup> (J/m <sup>2</sup> /year)	Tr <sub>NPP</sub> <sup>(iii)</sup> (seJ/J)	ENPP <sup>(iv)</sup> (seJ/m <sup>2</sup> /year)	EQF <sup>(v)</sup> (gha/ha)
Cropland	944.44	14232400	3253.54	4.6306E+10	1.9661
Pasture land	1111.11	16744000	1995.06	3.3405E+10	1.4183
Forest	1472.22	22185800	855.41	1.8978E+10	0.8058
Low productivity	135.56	2042768	9960.00	2.0346E+10	0.8639
Wetland	2622.22	39515840	150.57	5.9501E+09	0.2526
Continental and glacial water	222.22	3348800	9960.00	3.3354E+10	1.4162
Built land <sup>(vi)</sup>	722.22	10883600	3253.54	3.5410E+10	1.5035
<b>Terrestrial Total:</b>	<b>868.89</b>			<b>2.3552E+10<sup>(vii)</sup></b>	
Fishing	246.67	3717168	9000	3.3455E+10	2.0293
Open ocean	102.22	1540448	9000	1.3864E+10	0.8410
<b>Marine Total:</b>	<b>126.67</b>			<b>1.6486E+10<sup>(viii)</sup></b>	

<sup>(i)</sup> NPP data of terrestrial ecosystems was obtained from Amthor et al. (1998) and in the case of marine ecosystems from Thom et al. (2001). It was assumed that the biomass has 45% of C;  
<sup>(ii)</sup> NPP<sub>ENERGY</sub> (J/m<sup>2</sup>/year) = NPP<sub>MASS</sub> (g/m<sup>2</sup>/year) \* 3.6(Kcal/g) \* 4186(J/kcal);  
<sup>(iii)</sup> NPP transformity (Tr-NPP) for terrestrial biomes was calculated with the equation: Ln (Tr<sub>NPP</sub>) = 28.703 - 3,0093 Ln (NPP<sub>MASS</sub>) (Siche et al., 2006a). For marine ecosystems, a transformity of 9,000 seJ/J was considered (Odum, 1996);  
<sup>(iv)</sup> ENPP<sub>(ENERGY.NPP)</sub> = NPP<sub>ENERGY</sub> \* Tr<sub>NPP</sub>;  
<sup>(v)</sup> Equivalence Factor (EQF) = ENPP<sub>BIOMA</sub> (seJ/m<sup>2</sup>/yr) / ENPP<sub>GLOBAL</sub> (seJ/m<sup>2</sup>/yr);  
<sup>(vi)</sup> NPP<sub>MASS\_BUILT LAND</sub> = NPP<sub>MASS\_CROPLAND</sub> - NPP<sub>MASS\_HUMAN AREA</sub>. Where: NPP<sub>MASS\_HUMAN AREA</sub> = 100/0.45 = 222.22 g/m<sup>2</sup>/year (Amthor et al., 1998);  
<sup>(vii)</sup> NPP total energy of terrestrial ecosystems (3.03E+22 seJ/yr) on the terrestrial total area (1.29E+12 m<sup>2</sup>), and NPP total energy of marine ecosystems (1.07E+22 seJ/yr) on the terrestrial total area (6.52E+11 m<sup>2</sup>).

Source : Siche et autres, 2007

Notons dans ce tableau l'intensité spécifique moyenne de l'ENPP (Emergy NPP) terrestre, qui est de 2,35 E+10 seJ/m<sup>2</sup>/an, que Siche et autres ont mesurée en la rapportant comme Odum à la surface élémentaire, le m<sup>2</sup>.

Maintenant, divisons simplement ces seJ/m<sup>2</sup> par 1 m. Nous obtenons 2,35 E+10 seJ/m<sup>3</sup> sans avoir rien changé, sauf à avoir maintenant une pression moyenne des écosystèmes.

Puis regardons par anticipation quelques résultats du calcul de l'actif écologique.

Tableau 30 (figure 78) : Quelques résultats anticipés de l'Actif écologique

Territoire de référence : Communes du Parc Naturel Régional Préalpes d'Azur (PNRPA - 06)											Surface (ha)	
Année de référence : 2000											103.949	
Etat standard (masses sèches) de la biomasse (CH <sub>2</sub> O)						Etat naturel (masses humide) de la biomasse (CH <sub>2</sub> O)						
© R.Loiret - 2015	M	pV	p	V = pV/p	Em = pV/M	m	M2=M/m	pV.m****	p2 = p.m	V2 = V/m	Em2 = Em.m	
Stocks/flux de carbone du territoire	Masse	Exergie standard du territoire **	Etalon pression	Volume standard	Exergie massique standard	Indice Ka DES***	Masse humide	DET**** Exergie utile	Pression moyenne	Volume humide	Exergie massique moyenne	
grammes (gC)	grammes	Joules (J)	J/m <sup>3</sup> = Pa	m <sup>3</sup>	KJ/g	m	grammes	J.m****	J/m <sup>3</sup>	m <sup>3</sup>	KJ/g	
<b>Actif écologique</b>												
<b>(1) Stocks année n</b>												
	pVs					DER						
CHL*	8,74E+12	1,43E+13	4,02E+17	2,29E+10	1,76E+07	28,17	0,26810	5,32E+13	1,08E+17	6,14E+09	6,55E+07	7,55
GPL*	3,79E+12	5,60E+12	1,97E+17	3,12E+10	6,32E+06	35,23	0,31361	1,79E+13	6,19E+16	9,78E+09	2,02E+07	11,05
	pVo					DEO						
Σ	1,25E+13	1,99E+13	5,99E+17		2,39E+07		7,11E+13	1,70E+17			8,56E+07	
Moy.	pV					DET						
			2,51E+10						7,00E+09			8,43

\*CHL = Cellulose, Hemicellulose, Lignine GPL = Glucides, Lipide \*\* Résultats Stoechiométrie territoriale  
 \*\*\* DES = Distance à l'équilibre statistique de la diversité structurale  
 \*\*\*\* pV.m = Joules.mètre (J.m) = DET = Distance à l'équilibre thermodynamique de la diversité biologique = distance de réduction (DER) + distance d'oxydation (DEO)

N'est-il pas étonnant de constater que cette pression moyenne des écosystèmes est très proche de la valeur moyenne des étalons de pression du tableau 30, qui concerne la matière organique du territoire mesurée en CHL et GPL, soit 2,51 E+10 J/m<sup>3</sup> ?!

Sachant que cette pression est une pression théorique standard des matières sèches, et non pas à l'état naturel, nous constaterons par ailleurs, en rapportant tout aussi bien les autres valeurs d'ENPP du tableau 29 au  $m^3$ , que la valeur des zones humides (Wetland) tend à la baisse, avec  $5,95 E+9 \text{ seJ}/m^3$ , ceci exactement comme la pression moyenne de  $7,00 E+9 \text{ J}/m^3$  du tableau 30, que nous entendons comme une pression à l'état naturel humide de la matière organique du Territoire.

Ce qui tend fortement à vérifier que la pression interne de la matière organique reflète, avec son volume résultant, ce travail des forces naturelles que voulait tant signifier Odum.

Travail vu comme le résultat direct et le plus tangible de la *direction de l'évolution*, qui a toujours plus *comprimé* le volume des organismes (du Velociraptor à l'Alouette !?), pour augmenter leur pression interne et leur efficacité, respiratoire (figure 58), métabolique, dynamique, ... !

Nous appuierons ce constat par un exemple illustré qui nous servira aussi au paragraphe suivant, et qui semble résumer tout le problème d'Odum et Jørgensen.

Considérons l'état supposé parfait d'une distance à l'équilibre statistique ( $D_{ES}$ ) égale à « 1 », représenté par le graphite ou le diamant.

Puis, vis à vis de celui-ci, considérons à revers la différence d'état entre la vase (qui a pu former une grande part du milieu originel de la Biosphère) et le mélèze (produit de l'Ecosphère), tous deux formés grosso modo des mêmes constituants.

Admettons ensuite que l'une et l'autre de ces deux matières aient couvert à la suite (des millénaires) notre territoire de référence.

Il se pourrait bien que pour ces deux formes de matière organique, nous obtenions une exergie totale standard ( $pV$ ) et une tension de surface identique.

Regardons pour l'illustrer la première ligne du tableau 30, et, plutôt que de développer une démonstration spécifique, imaginons simplement que l'état *standard* (sec) représente le mélèze, et l'état *naturel* (humide) la vase.

Que ce soit l'un ou l'autre, leur exergie totale en joules serait constante. On vérifie en effet que l'exergie totale de l'état standard :  $28,17 \text{ MJ}/\text{kg} \times 1,43 E13\text{g}$  est bien égale à celle de l'état naturel :  $7,55 \text{ MJ}/\text{kg} \times 5,32 E13 \text{ g}$ , soit  $4,02 E17 \text{ J}$ .

Et si nous rapportions cette exergie totale  $pV$  à la surface constante de notre territoire, nous obtiendrions alors une « tension de surface » en  $\text{J}/m^2$  exactement identique, pour ces deux matières organiques considérablement différentes.

Ainsi la tension de surface ne nous aurait jamais permis de distinguer la vase du mélèze, tout comme à Mondego elle ne permettait pas de caractériser explicitement les placettes non eutrophiées des eutrophiées.

Alors que rapportée à leur volume, cette exergie totale donnera leur pression interne, qui se révèle très différente.

Comme l'a montré une étude de Jacqueline Doat (1977), sur le pouvoir calorifique des bois tropicaux, réalisée à partir de 115 espèces différentes de diverses provenances (Surinam, Indonésie, Haute-Volta, Cameroun, Congo, Côte-d'Ivoire, Gabon, Equateur, zones tempérées), il existe une corrélation de 0,03 entre la densité des bois tropicaux et leur pcs mesuré en calories/gramme (qui peuvent être rapportés à une surface), et une corrélation de 0,99 entre cette même densité et leur pcs mesuré en calories/ $dm^3$ .

Seule leur pression interne est ainsi à même de les différencier.

Ce qui nous confirme toute les relations que nous avons pu vouloir établir, d'une part entre exergie massique et surfacique, d'autre part entre densité massique et densité énergétique, telles que nous les avons initiées dans notre tableau 7.

Conclusion de cette partie de notre conclusion, l'exergie surfacique est peu signifiante et qualifiante, quelle que soit son intensité que nos auteurs ont tenu à caractériser, à la différence de l'exergie volumique, qui semble bien cumuler à elle seule toutes les grandes vertus des travaux d'Odum.

### 3.5.2.2 De pV à pV.m

Cependant, même en passant de la surface au volume, il y avait une dimension qui manquait encore aux forces de pression de la Biosphère (premier principe biogéochimique).

Comme Jørgensen a tenu à la caractériser, elle serait cette fois significative des forces structurales et informationnelles de la biodiversité dans l'Ecosphère (second principe biogéochimique), tout en augmentant l'efficacité de celles de la Biosphère.

Reprenons notre exemple précédent.

Entre l'état de la vase (nous pourrions plutôt parler de mousse pour la lithosphère !) et du mélèze, qui auraient couvert successivement ce territoire, il faut bien que diverses forces soient ensemble intervenues au cours du temps pour intensifier la pression interne et la distance à l'équilibre thermodynamique ( $D_{ET}$ ), parmi lesquelles les forces de structuration de la composition moléculaire, de densification des fibres, et d'élimination de l'humidité interne semblent les plus importantes.

La diversité structurale d'un territoire, qui résulterait de ces forces, participant de l'*aromorphose*, ayant agi sur la matière organique, « résumerait » ainsi leur action conjuguée.

Et la distance à l'équilibre statistique ( $D_{ES}$ ) de ce territoire, qui a vocation à mesurer sa diversité structurale, caractériserait alors l'état de sa matière organique à un moment donné.

La conjugaison de sa  $D_{ES}$  et de son exergie « totale », supposée constante quel que soit l'état interne de sa matière organique (vase, mousse ou mélèze), permettrait donc de refléter avec la  $D_{ET}$  (mesurée en  $J.m$ ) l'état d'organisation/structuration interne de cette matière, vue comme exergie *biogéochimique*.

$D_{ET}$  elle-même décomposable en un volume et une pression de la matière organique qui caractériseront un « état naturel, humide » différenciant très précisément la vase du mélèze.

Etat naturel que nous entendons donc comme un état de la biodiversité, le plus proche de l'état vivant, formé de tous les éléments, productifs et non productifs (vis à vis de leur consommation économique), de l'exergie biogéochimique, humidité compris.

Ainsi, comme nous l'avons vérifié avec les placettes de l'écosystème de Mondego, leur contenu en «  $J.m$  » permettrait de qualifier et différencier beaucoup plus précisément l'état naturel des matières organiques (et organismes vivants), tout en nous donnant un indice très précieux de leur contenu énergétique « réel », au sens d'une utilité telle que l'économie la consomme.

Ceci tout en prenant en compte la grande différence entre les organismes caractérisés par une exergie GPL, et ceux caractérisés par une exergie CHL ; les premiers étant généralement consommés quasi en l'état, à l'exemple du poisson, le métabolisme

individuel se chargeant de faire le tri entre les différents éléments moléculaires, les seconds étant plutôt consommés après un tri et une intensification, notamment énergétique (raffinage), réalisés par le métabolisme économique.

Au lieu de la vase et du mélèze, nous aurions ainsi pu comparer le pétrole brut tel que nous le trouvons à l'état naturel, et l'essence raffinée ; nous aurions trouvé des différences similaires à celles du tableau 30, l'eau interne y jouant un moindre rôle.

Ce qui assimile « partiellement » la différence entre  $pV$  et  $pV.m$ , à celle entre PCS (pouvoir calorifique supérieur) et PCI (pouvoir calorifique inférieur) d'une énergie fossile.

La mesure en  $J.m$ , selon que l'indice  $Ka$  est plus ou moins proche de 1, nous permet ainsi de concevoir toute la distance que peut parcourir une matière à l'état naturel, jusqu'à son état écosystémique abouti, supposé parfait au sens économique.

Et ainsi, pour ce qui est de la vase et du mélèze, de concevoir tout le travail des forces *naturelles* qu'il aura fallu pour intensifier la pression interne de l'une jusqu'à parvenir à celle de l'autre.

La mesure en  $J.m$  nous permet aussi de concevoir pour le pétrole brut et l'essence tout le travail des forces *économiques* qu'il faudra pour intensifier la pression interne et la productivité naturelles de l'un, jusqu'à parvenir à pression interne et la productivité économiques de l'autre.

L'économie ayant pris ainsi le relais de l'aromorphose développe une direction tout à fait comparable à celle de l'évolution, mais oh combien plus coûteuse.

Ce qui nous mène à la signification économique du Joule.mètre.

### 3.5.3 Sur la signification économique du Joule.mètre ( $J.m$ )

Quand nous aurons calculé le passif, en joules, d'une collectivité territoriale quelconque, nous pourrons le rapporter à son emprise territoriale selon la nomenclature Corine Land Cover (CLC), et obtenir l'intensité de sa consommation d'exergie rapportée à des catégories de surfaces, des plus naturelles aux plus urbaines, en passant par les zones industrielles.

Ce qui nous ramènera aux  $J.m^2$  par lesquels Odum et Jørgensen, mais aussi Wackernagel, ont caractérisé la fertilité et la biodiversité.

$J.m^2$  avec lesquels nous obtiendrons en quelque sorte la *tension de surface économique*, ou la *fertilité économique* d'une collectivité territoriale, c'est à dire le niveau d'intensité énergétique au  $m^2$  des différents étapes du processus de transformation des produits.

Cette fertilité économique nous permettra de constater que l'économie, comme l'évolution naturelle, suit une direction d'intensification énergétique continue des produits venant de la Biosphère et l'Ecosphère jusqu'à leur consommation finale par les ménages.

Et à un point tel que la *fertilité économique* la plus importante, jusqu'à « 1.000 fois » supérieure à celle des sols agricoles, se trouvera tout au bout du processus économique, dans les « déchets » (décharges et stations d'épuration).

Intensification progressive qui pourrait bien représenter la contrepartie de l'intensification monétaire tout au long du processus de production ; ce qui fut tout le sens de la réflexion d'Odum sur la consommation d'énergie et la production monétaire.

La fertilité économique serait-elle ainsi comparable à la fertilité biologique des sols et à la biodiversité ?

Autrement dit, dans le calcul comparatif du bilan écologique, devons-nous opposer aux stocks d'exergie des écosystèmes naturels les stocks d'exergie détenus par l'économie, qui interviennent à tous les stades de la production de valeur ajoutée ?

Quid alors des déchets ? Ceci quand, dans les écosystèmes naturels, ils participent entièrement de leur productivité (cf. les BMC).

Nous atteignons ici la limite extrême de l'exergie dans sa dimension en joules, serait-ce même en faisant intervenir le volume (pression en  $J.m^{-3}$ ) plutôt que la surface. Car les décharges auront plus encore que la fertilité en  $J.m^{-2}$ , une pression interne considérablement supérieure aux sols, naturels ou agricoles.

Cette même limite que Schilizzi avait soulignée (paragraphe 1.2.1.) quand, malgré l'introduction de la notion d'exergie, il avait vérifié combien les ambitions de l'analyse énergétique se heurtaient encore à des contraintes mettant en avant une barrière théorique radicale : l'inexistence d'une théorie de la valeur ajoutée expliquant à partir de la formation des valeurs d'usage du monde de la nature, leur transformation économique en valeurs échangeables sur le marché.

Ce qui nous ramenait tout à l'origine du débat Podolinsky/Engels.

Après quoi il avait ainsi conclu une partie importante de sa thèse, dans une citation qu'il nous semble opportun de reprendre ici :

Il nous manque une théorie cohérente de la production de valeur-ajoutée. Une telle théorie devrait faire intervenir simultanément les concepts de travail physique, que nous avons développé au cours de cette étude, et de travail informationnel, encore rebelle à l'analyse [...] Dans le processus de production d'un produit, les matières premières peuvent être considérées comme contenant peu d'information (ou une entropie élevée), alors que le produit est « informé ». Cependant ces mêmes matières premières, vues comme des ressources naturelles devant être dégradées avant de finir leur vie à l'état de déchets, apparaissent comme étant « naturellement » structurées et riche en néguentropie relativement aux déchets « déstructurés » rejetés dans l'environnement. Manifestement, l'emploi du concept d'entropie dans son sens informationnel pose problème et s'avère peut-être inadéquat ou appliqué trop superficiellement. Ou alors il faut supposer que le produit consommé et rejeté dans l'environnement « charrie » avec lui plus d'entropie que n'avait été prélevée de néguentropie à titre de ressources naturelles, la production nette d'entropie pouvant venir du maintien et du renouvellement des structures productives [Schilizzi, 1987].

Cette citation est particulièrement intéressante en ce qu'elle reprend la question de la valeur, ajoutée ou dégradée tout au long du processus, depuis la production originelle des ressources naturelles jusqu'à la formation des déchets.

Et où il apparaît que l'énergie et l'information interviennent alternativement ou simultanément dans la formation du produit, sans que l'on puisse jamais extraire le pourquoi du comment.

Mais notre auteur semble restreindre ce travail informationnel à la seule sphère économique, faisant que la néguentropie, à priori d'origine naturelle, se trouve complètement chamboulée dans l'origine de son sens et de sa formation.

Ceci fut une première raison pour laquelle nous avons abordé le double concept d'énergie et d'information depuis leur production originelle, et successive, dans la Biosphère et l'Ecosphère, jusqu'aux deux principes biogéochimiques de Vernadsky.

Et n'avons pas restreint la production d'information à la seule Anthroposphère !

Ce qui nous aura permis de préciser le second principe biogéochimique, bien moins explicite dans son rôle « informatif » vis à vis de la *direction de l'évolution* que Lotka ne l'avait lui-même souligné ; ceci faisant que Vernadsky n'ait pu complètement caractériser

l'Ecosphère, quoiqu'il distinguait nettement son champ thermodynamique de celui de la Biosphère. Mais rôle informatif des biogéocénoses de l'Ecosphère que Schmalhausen aura ensuite approfondi après la mort et sur les conseils de Vernadsky.

Et ce qui fut une seconde raison pour laquelle nous avons approfondi le concept d'entropie au regard de la théorie de l'information, avec les contradictions que nous avons soulignées, et les propositions que nous avons apportées.

Toutes confusions donc, dont l'exergie en joules, y compris la densité énergétique, ne saurait rendre compte !

Comment pourrions-nous dès lors différencier dans un système comptable, serait-il en mesure biophysique, le sol fertile d'un écosystème de celui d'une décharge, ou un écosystème marin vivant du bassin de décantation d'une station d'épuration ?

Et entre ces deux extrêmes, comment différencier au long des étapes, les matières naturelles structurées (information-structure), le surplus d'information du travail de l'Anthroposphère, puis tout au bout les matières naturelles déstructurées rejetées dans l'environnement ?

Il nous semble pour notre part, comme il en fut de nos interprétations de l'écosystème de Mondego, que la distance à l'équilibre statistique ( $D_{ES}$ ) et la distance à l'équilibre thermodynamique ( $D_{ET}$ ), apportent à ces questions, et au débat qu'elles soulèvent, un début de réponse « structurée ».

Ainsi par exemple, que ce soit dans un bassin de décantation ou une décharge, la matière organique (avec les autres matières biogènes) est soit finement dispersée (dissipée !) dans l'eau, soit finement broyée et mélangée avec les autres matières (déstructurée donc).

De ce fait, la  $D_{ES}$  de ces matières mélangée sera très faible. Et consécutivement, quelle que soit leur exergie massique ou volumique, leur exergie  $pV.m$  ou  $D_{ET}$  sera elle aussi très faible, et avec elle, leur valeur économique.

Elle aura reflété « l'état naturel » des déchets urbains !!!

Ainsi l'exergie  $pV.m$  trouve t-elle un complément de signification mieux encore lié à la valeur économique.

Pour toutes les raisons exposées dans cette conclusion, nous développerons le **Bilan écologique** en deux étapes bien distinctes d'application du système de mesure.

Aux niveaux séparés du calcul de l'actif et du passif écologiques, nous nous situerons d'abord en 2D, à l'échelle « horizontale » des territoires, et établirons toutes nos mesures en joules, la dimension apparente de  $pV$ , reportée à des masses ou des surfaces.

Puis nous établirons une version « A », dite fonctionnelle, du bilan.

Puis nous donnerons une version stœchiométrique de l'actif et du passif. Ce qui nous permettra de fournir une version « B » du bilan dite stœchiométrique, où nous passerons à l'échelle « verticale » en ajoutant partout la hauteur, de la masse organique, de la troposphère, de l'hydrosphère, de la lithosphère, ...

La conjuguant aux surfaces précédentes, nous passerons ainsi en 3D, aux dimensions internes de volume et pression de  $pV$ , puis à la distance à l'équilibre statistique et thermodynamique des territoires ; elle deviendra ainsi cumulable jusqu'à l'échelle des champs thermodynamiques de l'Ecosphère et de la Biosphère.

A partir de quoi nous entrons désormais de plein pied dans la dimension pleine et entière du **Bilan écologique**.

## Troisième partie

### Développements méthodologiques et mise en œuvre du **Bilan** *écologique*

**.Chapitre IV.**  
**Territoire et années**  
**de référence**

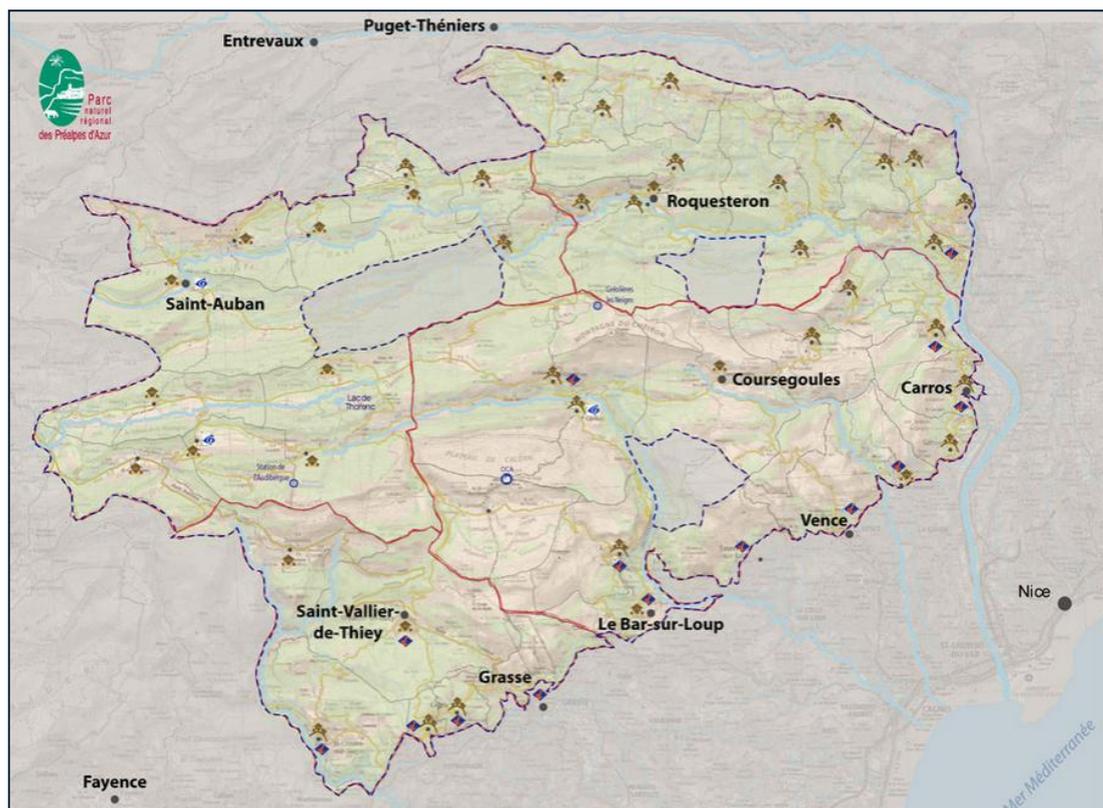
*Le **chapitre IV** présente le Territoire et précise les années de référence du bilan.*

## 4.1 Territoire de référence : Les « communes »<sup>183</sup> du PNRPA

Notre territoire naturel de référence est celui des « communes » du parc naturel régional des Préalpes d'Azur (PNRPA), dont le siège est à St Vallier, dans les Alpes Maritimes (06). Sa création a été entérinée par le décret n°2012-421 du 28 mars 2012 du Ministère de l'écologie, du développement durable, des transports et du logement.

Nous nommerons dans notre travail ce territoire de référence : **Le Territoire.**

Figure 79 : Périmètre du PNRPA



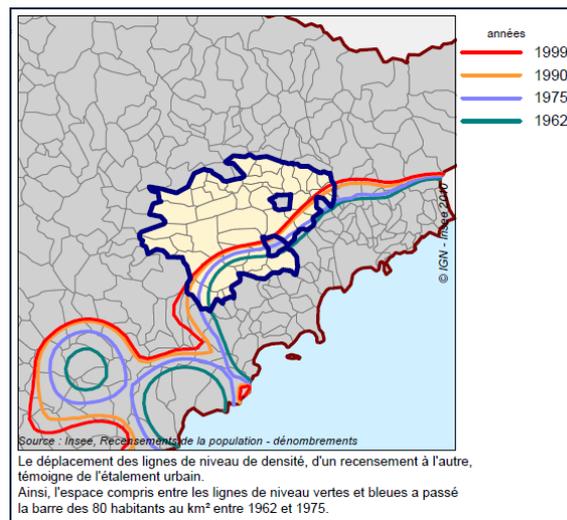
Source : PNRPA

Le PNRPA compte 49 communes dans son périmètre (cf. tableau 11). Mais il y a une différence importante entre le périmètre et la population de ces communes, et le périmètre et la population du PNR.

La frange sud du périmètre du PNRPA se situe en effet sur les limites de forte densification urbaine des Alpes Maritimes (voir figure suivante), et celui-ci s'est trouvé confronté à une nécessité de rééquilibrage territoire/population entre les communes très urbaines et les communes rurales.

De ce fait, son périmètre a été arrêté en bordure des limites urbaines des sept communes parmi les plus importantes (Carros, Gattières, Grasse, Le Broc, Saint-Jeannet, Tourettes sur Loup et Vence), dont la population n'est prise en compte que partiellement.

<sup>183</sup> En termes d'emprise et de population, il y a une différence importante entre les communes du PNR et son périmètre, voir plus bas.

Figure 80 : Seuil de densité à 80 hab/km<sup>2</sup>. Evolution 1962-1999

Source : Insee, 2010, Portrait de territoire : Le PNRPA

Ainsi, à la date finale de nos travaux de recherche appliquée (juin 2013), le périmètre du PNRPA couvrait une surface globale de 90.000 hectares pour une population de 31.663 habitants (recensement Insee, 2010).

Alors que ses communes couvraient une surface globale de 103.949 hectares (CLC 2006) pour une population de 99.716 habitants (recensement Insee, 2010).

Cette différence de périmètre et de population est capitale dans le cadre d'un bilan susceptible de comparer un actif et un passif écologiques. Il importe en effet que les calculs soient faits selon un standard comptable identique, permettant la comparaison, entre passif et actif, et entre territoires d'échelle similaire (création d'un référentiel), puis l'agrégation des résultats à l'échelle du département, de la région, du pays,...

Raison primitive essentielle pour laquelle, pour tous nos calculs, nous avons retenus les cadres et nomenclatures de recueil des données les plus standardisés et partagés, au minimum à l'échelle européenne.

Ainsi de la nomenclature Corine Land Cover (CLC) et de la NPP pour l'actif écologique, puis du Tableau Entrées-Sorties (TES) monétaire national, des nomenclatures NES et COICOP, ..., pour le passif écologique.

Il en résultera que nous retiendrons pour notre territoire de référence, non pas le périmètre et la population du PNR, mais le périmètre et la population des communes ayant adhéré à sa charte.

Une fois regroupée en un seul ensemble territorial, leur surface est subdivisible, selon la nomenclature CLC (44 postes), en 24 grands types d'occupation des sols<sup>184</sup> qui en 2000 se répartissaient comme on le verra dans le tableau 31, page 305.

<sup>184</sup> Notons pour mémoire que nous avons établi au long de notre recherche, sur la base d'un travail de fond financé par la Commission européenne, une « table de correspondance » entre les 44 postes de CLC et les 95 postes de base de la nomenclature « EUNIS » des écosystèmes, dont le niveau détaillé compte 5136 postes. Ce qui nous donne une nouvelle nomenclature CLC/EUNIS de 95 postes, qui établit le lien avec EUNIS détaillée, et nous permet en toute théorie de représenter, à partir de CLC, n'importe quel type d'écosystème avec le plus grand niveau de détail voulu.

## 4.2 Années de référence

Nous avons dans nos premiers travaux (Loiret, 2011c) développé tous les calculs d'Empreinte écologique des communes du PNRPA, selon la méthodologie REAP (voir Passif écologique), pour l'année standard 1999, où les services statistiques de l'Insee offraient cette année là un TES118 national (comptes monétaires de la France) et des enquêtes de consommation des ménages parfaitement coordonnés.

Ces calculs de la méthodologie REAP sont très laborieux et nous ne les reproduirons pas tel que pour les années ultérieures, mais plus tard seulement, à partir de notre méthodologie simplifiée de calcul du passif écologique, tels qu'on la découvrira au chapitre VI.

Le Passif écologique, qui utilise lui aussi les données de désagrégation locale de la méthodologie REAP a donc été calculé pour l'années standard 1999.

Afin d'établir une comparaison des données de l'actif et du passif, nous retiendrons donc en comparaison, pour l'actif écologique, les données de référence de l'année 2000, année de mise à jour des comptes de la nomenclature Corine Land Cover (CLC).

Une seule année de différence sera de peu d'incidence pour nos comparaisons finales, dans le cadre de résultats qui ne sont à ce stade que ceux d'une recherche doctorale (avec toutes les réserves que cela autorise), centrée avant tout sur la rigueur méthodologique.

## **.Chapitre V.**

### **Actif(s) écologique(s)**

*Le **chapitre V** a pour objectif de développer les principes méthodologiques de calcul de l'Actif écologique, puis de les appliquer aux espaces naturels du Territoire.*

*Il développe à la suite des chapitres précédents les principes généraux du système de mesure utilisant la nouvelle métrique que nous proposons, jusqu'à leur application. Soit, d'une part, l'estimation des stocks d'exergie pV.m des espaces naturels pour l'année n de référence, d'autre part, des flux annuels de production d'exergie pV.m (stœchiométrie territoriale) pour l'année n+1, permettant de calculer les stocks de l'année n+1.*

## 5.1 L'Actif écologique : Définition générale et emprise

Par définition, en nous reportant à l'assise conceptuelle et au cadre opérationnel de mesure du bilan écologique (figure 3), l'Actif écologique, sa porte d'entrée, couvre potentiellement tout ce qui a participé et participe à la production de la  $D_{ET}$  d'un territoire (stocks d'exergie) et à son entretien (flux annuels d'exergie).

### Stocks d'exergie des espaces et territoires naturels :

- Exergie *géochimique* (matières biogènes) de l'atmosphère,
- Exergie *géochimique* (matière organique) et *biogéochimique* (matière et organismes vivants) de l'hydrosphère, maritime et intérieure (lacs, rivières, ...),
- Exergie *géochimique* (matières biogènes) et *biogéochimique* (matière et organismes vivants) de la lithosphère, superficielle et profonde (énergies fossiles, ...).

### Flux de production d'exergie :

- Des espaces naturels de l'hydrosphère, maritime et intérieure,
- Des espaces naturels de la lithosphère,
- Des espaces, écosystèmes et territoires sous contrôle de l'anthroposphère (aquaculture, forêts gérées, agriculture et élevage).

Cas particulier de l'Hydrosphère : Beaucoup de collectivités territoriales de l'espace national intérieur, à l'exemple de notre territoire pilote, n'ont pas de littoral et d'espace maritime, alors que leurs populations bénéficient de leurs services écosystémiques et consomment leurs biens et produits, qui proviennent, selon le type de pêche, artisanale ou industrielle, de la zone littorale, des eaux intérieures nationales ou des eaux internationales parties du patrimoine commun.

L'actif écologique étant estimé à partir du territoire effectif, il est peu concevable d'allouer un stock de phyto et zooplancton, un stock halieutique ainsi que les flux correspondant aux collectivités intérieures, alors que pourtant leurs populations, tant par leur consommation que leurs émissions et rejets interviennent dessus, directement ou indirectement.

Ce qui supposerait d'adopter une convention d'allocation des ressources maritimes et halieutiques à chaque territoire et sous territoire national, afin de mesurer l'impact relatif de leurs consommations sur ces ressources, en stock et en flux. Nous aborderons cette question lors du Bilan écologique.

## 5.2 Méthodologie de calcul : De la $D_{ET}$ d'un écosystème à l'actif écologique d'un territoire

### 5.2.1 De l'écosystème au territoire : Problématique de synthèse

Souvenons-nous du deuxième aspect de notre problématique vitale (paragraphe 2.4.2.). Outre l'indice de Shannon, les facteurs  $\beta$  et la *théorie des écosystèmes* se confrontaient à une problématique d'échelle par laquelle ils échouaient à rendre compte, tel que le décrivait la CBD, de la pleine gamme de la diversité biologique, depuis la variation génétique intra spécifique jusqu'à la richesse en espèces, la connectivité et l'arrangement structural/spatial des écosystèmes à l'échelle entière d'un paysage.

Des lacunes dans le modèle proposé échouaient à rendre un juste compte de ces échelles spatiales, mais aussi des échelles temporelles de la biodiversité, ainsi que du changement d'utilisation des terres et du dysfonctionnement de la diversité.

Ce qui reflétait bien une problématique de reproduction homogène de la mesure de la diversité différentielle  $\beta$  aux différentes échelles du vivant, ainsi que de sa variation temporelle.

Dès lors un concept unificateur de la durabilité devrait combiner les principes de la théorie des écosystèmes et de la biodiversité structurale. L'objectif étant de développer un cadre unifié conjuguant les attributs structuraux et fonctionnels de la biodiversité, de l'échelle des organismes à l'échelle de la Biosphère.

Nous avons pour notre part testé à ce stade l'indice  $Ka$  dans plusieurs dimensions :

- Pour mesurer la diversité spatiale et structurale d'un territoire (paragraphe 3.1.5.). Ainsi les  $HKm^3$  ont rendu compte de la diversité spatiale/structurale de notre territoire de référence, ainsi que de sa variation temporelle au long des divers changements d'utilisation des terres que supposent l'extension de l'Anthroposphère sur les espaces de l'Ecosphère.

- Pour vérifier ses capacités, isolé puis conjugué avec l'exergie pV, à mesurer outre la direction redox de l'intensification énergétique, les diversités structurales et fonctionnelles d'un petit écosystème, à travers sa  $D_{ER}$  et sa  $D_{EO}$ .

Il nous semble que la combinaison de ces diverses propriétés de l'indice et de sa conjugaison, nous offre à priori ces attributs recherchés, tant fonctionnels que structuraux, d'une mesure de la biodiversité, depuis l'échelle des organismes à celle de la Biosphère.

La question est maintenant de développer le « système de mesure » adopté pour Mondego en un cadre unifié conjuguant ces divers attributs à l'échelle d'un territoire.

Nous nous confrontons pour ce faire à plusieurs contraintes méthodologiques liées au changement d'échelle entre un écosystème et un territoire.

Nous avons apporté à ce stade plusieurs réponses, qui nous ont permis d'élaborer un cadre primitif de mesure de l'actif écologique d'un territoire, suffisant à montrer les principes fondamentaux et le concept général du Bilan écologique, et d'en démontrer l'application sur un territoire en grandeur réelle.

Il est bien certain qu'un développement du Bilan écologique à très grande échelle, à l'exemple de l'Empreinte écologique, supposerait un cadrage, méthodologique, organisationnel et informatique, aussi rigoureux que son ambition.

## 5.2.2 Justification et présentation du cadre méthodologique

### 5.2.2.1 La biodiversité est-elle simplifiable ?

Quoique nous allons l'aborder, la question ne nous semble pas ici celle de la validité à une plus grande échelle du système de mesure de la  $D_{ET}$  que nous venons de proposer. Il n'y a aucune raison pour que ce qui serait valable à l'échelle de Mondego, ne le soit pas pour de grands écosystèmes.

La vraie question est celle des données fondant un tel calcul.

En fondant leur concept d'éco-exergie sur les organismes individuels, Jørgensen et ses partenaires (2007) n'ont pas dit, à notre connaissance, et sauf pour des milieux très homogènes comme les lacs, comment passer d'un ensemble restreint d'organismes identifiés et quantifiés par espèces au  $m^2$  (au cours d'un protocole long et coûteux), à un territoire différencié de plusieurs milliers d'hectares, qui supposerait de connaître, pour chaque type d'écosystème, le facteur  $\beta$  de l'ensemble des espèces présentes et leur quantité relative (ou le facteur  $\beta$  d'une forêt !?). Ceci d'autant que ces travaux ont porté tant sur les hétérotrophes que les autotrophes.

Nous ne saurions par ailleurs « simplifier » la biodiversité. La biodiversité au  $m^2$  d'un ensemble de placettes ne saurait être ramenée par une quelconque « moyenne » à l'échelle de l'hectare, et ainsi de suite jusqu'à un bassin versant de plusieurs milliers d'hectares. La biodiversité, n'est pas additive ; elle est par définition spécifique et intensive, et ne saurait subir aucun traitement mathématique visant à la « lisser » à grande échelle.

Comme nous l'avons vu avec Mondego, elle participe d'un niveau qualitatif de l'information permettant des comparaisons entre états, et il aurait été impensable de faire une moyenne de la diversité spécifique de ces placettes. Il n'existe pas de moyenne entre la bonne santé et la maladie, ou la vie et la mort ! Ceci quand il existe une différentielle entre ces états.

Ceci dit, et en référence aux figures 74 et 76, notre objectif n'est pas de connaître les différentes espèces d'un territoire, mais de « rendre compte » de sa biodiversité, en mesurant sa distance à l'équilibre thermodynamique.

La question, en se basant sur les principes appliqués pour Mondego, est ainsi de pouvoir passer d'une mesure *différentielle* basée sur des données locales reflétant en grandeur réelle les espèces et leur masse, à cette même mesure différentielle fondée sur des données d'exergie CHL-GPL disponibles à l'échelle d'un territoire.

Nous avons subdivisé ce problème en deux parties :

- Développement des principes de mesure de la  $D_{ET}$  à grande échelle
- Cadre primitif de mesure de l'Actif écologique d'un territoire

Après quoi nous passerons à son cadre de mise en œuvre.

### 5.2.2.2 Développement des principes de mesure de la $D_{ET}$ à grande échelle

Pouvons-nous utiliser la combinaison/conjugaison de l'indice  $K_a$  et des CHL-GPL à grande échelle ? Quoique la réponse intuitive nous semble évidente, nous examinerons ce problème poste par poste.

#### Pour ce qui concerne l'indice $K_a$

C'est une mesure non pas quantitative mais « différentielle » ; or si l'on se reporte à ses extrêmes, 0 et 1 (une étendue qui comporte autant de subdivisions possibles qu'entre 1 et l'infini), le différentiel de potentiel chimique entre chaque compartiment élémentaire (nature et nombre des atomes) d'une molécule végétale sera de même « amplitude maximale » que le différentiel de potentiel chimique entre les multiples combinaisons atomiques de chacun des compartiments d'un grand écosystème. La distance à l'équilibre nous semble un concept universel valable tout aussi bien pour une souris que pour une étoile géante.

#### Pour ce qui concerne l'exergie

Nous avons cherché à mettre en évidence son intérêt en ce que, de la molécule aux écosystèmes, jusqu'à l'Ecosphère toute entière, elle mesure quelle que soit l'échelle une même directionnalité, caractérisée de surcroît par un même indice ; et ainsi nous permet des changements d'échelle considérables sans changer de système de mesure.

#### Pour ce qui concerne l'usage des CHL-GPL

Nous découvrons à grande échelle tout l'avantage de l'utilisation des CHL-GPL. Ils couvrent le champ entier de l'économie. Quelle que soit la masse, du gramme au million de tonnes, leur mesure est parfaitement cohérente avec les standards techniques des process utilisant des matériaux et produits d'origine organique à la base de leur production (foresterie, agriculture, IAA, thermique industrielle, ...).

#### Pour ce qui concerne la diversité redox et le niveau d'information

L'échelle redox mini/maxi d'intensité énergétique des CHL-GPL sera exactement la même, au sein de l'Ecosphère, entre la simple molécule organique, la cellule végétale et la masse totale d'un écosystème, chaque strate nouvelle formant un macro-état systémique constitué de la somme différentielle des micro-états de la strate précédente.

La conjugaison  $pV.m$ , outre qu'elle nous donnera le niveau d'exergie biogéochimique, soit l'exergie utile d'un territoire, nous permettra avec les deux composantes de sa  $D_{ET}$ , de caractériser un territoire et de « signifier » l'état de sa biodiversité bien mieux que ne le permettait la simple exergie massique, qu'elle soit fondée sur l'éco-exergie ou l'exergie CHL-GPL.

### Synthèse

Nous sommes ainsi autorisés à supposer que le changement d'échelle entre un petit écosystème et un grand territoire est faisable, en utilisant le même système de mesure.

Ceci en cohérence avec l'« homothétie fonctionnelle » qui existe entre la cellule souche des autotrophes (issue de l'endosymbiose) et l'Ecosphère toute entière, qui fait de cette machine infinitésimale (cellule végétale à l'exemple d'Euglena) le modèle généralisé

d'une fonction redox étendue à l'échelle entière de la planète (cf. figure 16, et Falkowski et autres, 2008).

A la différence de masse près, nous aurions ainsi un indice du niveau d'information « standard » de l'exergie d'un territoire, exactement comme nous avons obtenu cet indice pour une molécule ou un écosystème. Ce qui serait confirmé par les différentes corrélations que nous avons établies, sachant que la directionnalité, au regard notamment du premier principe de Vernadsky, ne saurait selon nous avoir « changé de tendance » en passant de l'écosystème de base à un territoire « naturel », aussi grand soit-il.

### 5.2.2.3 Cadre primitif de mesure de l'Actif écologique d'un territoire

#### Source des données de l'exergie CHL-GPL à l'échelle territoriale

Avec Mondego, nous avons des espèces, leurs masses spécifiques puis leur exergie CHL-GPL, dont nous avons tiré nos indices puis pV.m et la  $D_{ET}$  des placettes.

A grande échelle, nous procéderons en quelque sorte à l'inverse : reconstituer le niveau d'exergie CHL-GPL d'un territoire pour en tirer les indices  $K_a$ , les diversités structurales et biologiques, ainsi que les deux composantes de la  $D_{ET}$ .

A partir desquels seulement nous aurons un indice global significatif d'une richesse en espèces et de l'état du territoire écosystémique que nous ne pouvons mesurer.

Comment dès lors mesurer l'exergie CHL-GPL d'un territoire ?

Nous l'estimerons à partir de différentes sources informations :

- Les surfaces spécifiques des grands types d'écosystèmes du territoire, telles que données par les postes de Corine Land Cover (paragraphe 2.7.2).
- Les masses de carbone du territoire, selon deux axes : ses « stocks » de carbone et ses « flux » annuels de carbone (GPP et NPP).
- La différenciation entre stocks de carbone réduits et stocks de carbone oxydés.

Nous obtiendrons sur ces bases (relativement standardisées) les indices  $K_a$  de réduction et d'oxydation du territoire.

La chose est plus compliquée que pour un écosystème mesurable, mais le principe général de calcul est le même.

Il nous permet surtout d'étendre cette mesure à n'importe quelle échelle spatiale.

#### Agrégation des valeurs d'indice lors des changements d'échelle

La question se pose, lors du passage d'une échelle à l'autre de la biodiversité, de l'agrégation des valeurs et de la constance des équivalences entre niveau de l'indice, niveau d'information et niveau d'énergie.

L'indice en soi n'est pas simplificateur (comme une moyenne), et nous avons pu apporter un certain nombre de réponses positives concernant une échelle de la biodiversité intégrant des échelles inférieures. L'indice s'enrichit au prorata des « données disponibles » aux échelles inférieures.

Mais la chose demande encore de toute évidence à être cadrée au sein d'une méthodologie globale dont nous n'avons à ce jour élaboré que les prémisses.

### Directionnalité territoriale et humidité des matières carbonées

Une question émerge, à l'échelle d'un territoire naturel, qui ne se posait pas à l'échelle de la molécule ou de l'organisme, tout du moins pas dans les mêmes termes : celle de l'humidité intrinsèque des différentes matières organiques ou organismes.

Dans nos tableaux 18 à 20, montrant l'intensification énergétique de réduction ou d'oxydation, le niveau d'exergie était donné en « matière humide », quand bien même les quantifications scientifiques et techniques de l'énergie se font la plupart du temps sur une base « matière sèche ».

Ceci parce qu'il nous apparaît aujourd'hui que le taux d'humidité des CHL et GPL au long de leur chaîne de production, illustre particulièrement la directionnalité des écosystèmes ; à l'exemple de la lignine pour les CHL, et de l'huile végétale pour les GPL, qui marquent deux extrémités significatives des directionnalités de réduction et d'oxydation, et qui sont les deux matières carbonées les plus « hydrophobes » que l'on connaisse à l'état naturel.

Ces matières semblent ainsi confirmer et amplifier le premier acte des autotrophes quand, après avoir réduit au printemps le glucose, ils le stockent en automne sous forme d'amidon. L'amidon n'est en effet rien d'autre que de la cellulose moins de l'eau :



Or l'eau, comme nous l'avons vu dans nos diverses équations stœchiométriques, contient son propre niveau d'exergie. Et nous pouvons vraiment nous demander, au moment exact où la plante réduit le gaz carbonique et l'eau en glucose, où elle trouve l'eau de cette réduction. Est-ce dans l'eau « déjà stockée » dans ses cellules, qui serait dès lors « constitutive » de ces cellules et de leur niveau d'exergie, ou dans l'eau absorbée par ses racines et feuilles (humidité atmosphérique) au fur et à mesure de ses besoins de réduction ?

La différence est pour nous primordiale, car dans le premier cas la mesure de l'exergie des tissus d'une plante implique que l'on intègre au kg de matière carbonée « la masse et l'exergie de l'eau » de cette matière, et dans le second cas non. On ne parle plus alors dans le premier cas de molécules chimiques dont on observerait la transformation au long de l'intensification énergétique, mais de ces molécules baignant dans leur milieu aqueux (comme pour un lait de coco), et formant avec lui un tout dont on observerait la transformation redox y inclus son humidité.

Dans nos mesures de diversité biologique, nous avons ainsi retenu la première hypothèse en ne retenant que l'exergie « humide » des CHL et GPL, selon une humidité standard des matières ; dès qu'elle est absorbée et stockée en interne, l'eau devient un élément significatif des processus de transformation moléculaire, et non pas un élément extérieur mesurable à part.

Le taux global de siccité interne de certaines matières carbonées d'un territoire pourra donc, dans nos mesures d'intensité énergétique, être fortement suspecté d'évoluer en parallèle avec son indice  $K_a$  et sa distance à l'équilibre thermodynamique. Comme il en est notamment des milieux « réductifs » forestiers, et de la « valeur d'utilité » des matières carbonées au regard de critères techniques comme le PCI (pouvoir calorifique inférieur), qui représente un niveau d'énergie « utile » à l'économie, et qui s'estime en fonction du PCS (pouvoir calorifique supérieur) et du taux de siccité des matières carbonées.

Ainsi, plus l'indice  $K_a$  sera faible, plus les matières organiques « baigneront dans leur jus », et à l'inverse, à l'exemple de l'étalon absolu du Buckminsterfullerène (paragraphe

3.1.5.2), elles iront vers une dessiccation interne de plus en plus importante dont le modèle devrait être pour l'Ecosphère celui des Deadlock, à leur sortie des BMC.

### GPP/NPP et comptabilisation de l'eau

Selon ces principes, la GPP/NPP (Gross ou Net Primary Production) d'un écosystème ne signifie donc pas grand chose tant que l'on n'intègre pas l'eau associée au carbone des molécules. Sans elle, pas de directionnalité mesurable, pas de mesure de la propension des plantes à l'évacuer de leurs tissus ; si ce n'est à l'évacuer de certains tissus (lignine) pour la concentrer dans d'autres (tissus jeunes, fruits, ...).

C'est pourquoi, tout en intégrant la GPP et la NPP dans notre calcul de l'Actif écologique d'un territoire, nous ne les intégrerons qu'en tant que « partie carbone », au sens chimique du terme, d'une « stœchiométrie territoriale » (voir plus loin) beaucoup plus significative où l'eau (ainsi que les autres éléments chimiques moléculaires), retrouvera toute la place qui lui revient ; là où elle était jusqu'à présent ignorée des calculs d'Empreinte écologique.

### Mesurer l'exergie « utile » d'un territoire

La GPP et la NPP mesurent les flux annuels de carbone d'un territoire, qui viennent en principe s'additionner aux stocks de carbone existant.

Mais quel est l'état de ce carbone ? Est-ce de la mousse végétale, des feuilles vertes, du balsa, des pommes et des poires, de l'huile d'olive, du chêne, de l'ébène ?

Et nous ne parlons ici que des écosystèmes de la lithosphère.

Or nous avons constaté avec l'écosystème de Mondego qu'une masse de carbone, serait-elle ramenée à une quantité énergétique, c.à.d. à une exergie massique (figure 74), ne nous dit à peu près rien de ses qualités vitales, et pour le moins de son « utilité économique ». Ceci d'autant que nous n'avons a priori pas les moyens de comparer les changements d'état d'un territoire (ensemble d'écosystèmes) à court ou moyen terme (comme il en était des placettes de Mondego).

GPP et NPP, tout aussi bien que les masses de carbone d'un territoire, ne nous disent donc « absolument rien » de la qualité de l'énergie de ce territoire. Et a fortiori de sa diversité biologique, et de sa  $D_{ET}$ .

Ceci quand, avec la conjugaison  $pV.m$ , puis avec la  $D_{EO}$  et la  $D_{ER}$  exprimées en  $J.m$ , nous pourrions différencier les flux et obtenir leur intensité énergétique spécifique ; et ceci faisant, nous pourrions en déduire dans le bilan final, en nous basant sur un volume constant, une variation de pression interne de la matière organique du territoire au long des saisons, et fonction de ses dégradations économiques.

Ce qui ne saurait cependant se faire en dehors d'un cadre général d'intégration de l'évolution biogéochimique du territoire en question.

### 5.2.3 Mise en œuvre du cadre méthodologique

La conjugaison  $pV.m$ , une fois vérifiées a priori sa faisabilité et son utilité à l'échelle d'un petit écosystème, tout du moins pour une étude qui garde les dimensions d'une recherche fondamentale et appliquée, suppose à l'échelle territoriale une nouvelle

dimension : la différenciation entre les stocks d'exergie de biomasse et leurs flux saisonniers de variation.

Le principe comptable général que nous avons adopté pour mesurer l'Actif écologique est ainsi le suivant :

### 5.2.3.1 Stocks d'exergie (biomasse), année n

pV sera le produit de la formule  $G_B + TS$  (37), qui se réfère par principe à un stock d'énergie, serait-il représenté par des organismes vivants, en croissance, qu'il est difficile d'assimiler à des stocks, car ils sont parcourus en continu de flux, tant assimilés que rejetés.

Nous baserons notre calcul des stocks d'exergie sur les stocks de carbone réduits (CHL) et oxydés (GPL) tant pour la végétation que pour les sols. En appliquant les étalons  $CH_2O$  et exergie massique des molécules représentatives des CHL et GPL, nous les transformerons en stocks d'exergie potentiels, qui nous donneront la pression et le volume théorique de la matière organique du territoire.

Sur quoi nous calculerons  $pV.m$ , tant pour les stocks réduits qu'oxydés ( $D_{EO}$  et  $D_{ER}$ ). La valeur « m » (indice  $K_a$ ) nous sera donnée par la diversité structurale du territoire de référence, comme pour les tableaux 10 et 11, mais en basant cette fois la mesure sur les masses de carbone, et non plus sur les surfaces.

Nous obtiendrons sur ces bases, à pV constant, les densités massiques, densités énergétiques et volumes de la matière organique du territoire dans son « état naturel » supposé (notamment son niveau d'humidité) d'exergie biogéochimique ; ils caractériseront la véritable « énergie utile », seule comparable, en termes de densité massique et énergétique, à celle que consomme l'Anthroposphère, comme nous aurons l'occasion de le constater après l'établissement du Passif écologique du territoire.

Notons que dans le cadre (global) final d'intégration de l'Actif et du Passif écologique, et afin de calculer une  $D_{ET}$  standard du territoire, ces stocks d'exergie, considérés comme parties de la lithosphère « superficielle », seront associés :

- Aux stocks potentiels correspondant de l'hydrosphère (ressources halieutiques, ...). Comme il s'agit d'un territoire naturel, cette association correspondra à une « allocation de stocks » basée sur un ratio surfacique, quant il devrait s'agir, pour des communes, d'un ratio par habitant.
- Aux stocks potentiels correspondant de la lithosphère profonde (diverses énergies fossiles), selon le même principe d'allocation.
- A la contrepartie atmosphérique générale, en termes de volume et pression, pour ses divers constituants chimiques, correspondant aux stocks d'exergie des lithosphères superficielles et profondes, et de l'hydrosphère.

### 5.2.3.2 Flux et stocks d'exergie (biomasse), année n+1

C'est une variation de stock, qui correspond à la formule  $dG_B + TdS = d(pV) = dp * dV = Cte$  (38).

Cette formule supposant une parfaite égalité des entrées et sorties, la mesure de ces flux annuels sera fondée sur une « stœchiométrie territoriale » (de nature surfacique et horizontale), dont nous développerons en temps voulu la méthodologie générale et les résultats.

Elle sera établie en deux parties respectant les principes fondamentaux de la thermodynamique, une stœchiométrie massique (à masse constante) et une stœchiométrie énergétique (à énergie constante).

Cette dernière nous donnant notamment la variation annuelle de  $D_{ET}$  ( $D_{ER} + D_{EO}$ ) des stocks de biomasse du territoire, à pV constant.

Après quoi, sans introduire à ce stade les passifs de l'Anthroposphère pour la même année, nous pourrions calculer les stocks théoriques d'actif de l'année n+1 et leur  $D_{ET}$  spécifique en fin de cycle.

Sachant que le cadre final d'intégration de l'actif et du passif bouclera sur une nouvelle stœchiométrie (de nature volumique et verticale, associant la surface du territoire à sa hauteur théorique totale), qui permettra de calculer les impacts réciproques cumulés des flux annuels d'actif et de passif sur tous les compartiments de l'Ecosphère du territoire, dont son atmosphère et son hydrosphère associée.

Ceci aboutissant sur une  $D_{ET}$  globale de l'année n+1 qui sera supposée constituer un indice de synthèse de la totalité des incidences des flux de production et de consommation, naturels et anthropogéniques, du territoire, sur son environnement global.

### 5.3 Actif écologique : Partie 1 - Stocks année n

#### 5.3.1 Stocks de carbone : Données source, principes de calcul

Comme nous le disions, notre objectif n'est pas de recenser les espèces d'un écosystème de grande ampleur, mais de rendre compte de ses diversités structurales et biologiques, et de sa distance à l'équilibre ; à partir d'un niveau d'exergie redox, tel que nous en avons développé les principes et tel que nous l'avons calculé pour les placettes de Mondego.

Sauf que dans ce dernier exemple, nous avons pu estimer l'exergie redox à partir de la masse des espèces d'organismes au m<sup>2</sup>. Ne pouvant disposer à grande échelle d'un tel recensement, nous estimerons cette exergie en procédant de manière différente.

Nous estimerons tout d'abord les stocks de carbone du territoire puis nous calculerons ses indices ( $K_a$ ) de réduction et d'oxydation pour la végétation et le sol, regroupés en indice CHL et GPL, en nous basant sur la diversité structurale de ces masses de carbone, répertoriées selon la nomenclature CLC. Après quoi nous estimerons les stocks d'exergie pV, puis d'exergie pV.m, en fonction de ces indices et de deux étalons (étalon carbone/CH<sub>2</sub>O et CH<sub>2</sub>O/exergie) que l'on trouvera au tableau 32.

Nous identifions deux grands types de stocks de carbone, ceux de la végétation et ceux du sol. Les premiers intègrent toutes les composantes, réduites et oxydées, de la végétation : racines, troncs, branches, feuillage, fleurs et fruits. Les seconds toutes les composantes, oxydées et réduite, du carbone organique, constituant ou non la fertilité du sol : branches, feuilles, fruits, en décomposition, humus, couche argilo-humique et Deadlock en voie de subduction.

##### 5.3.1.1 Végétation : principes de base, nature et source des données

Compte tenu de la grande variation saisonnière entre les stocks de carbone purement réduits (CHL des racines, troncs, branches, ...) et les stocks oxydés (GPL des jeunes branches, feuilles, fruits, ...), ainsi que de l'impossibilité « à priori » d'estimer les

stocks de carbone de la végétation « verte », nous n'avons estimé que les stocks réduits, sachant que la masse de végétation verte nous sera donnée par les flux de croissance annuels qui seront calculés par ailleurs.

Nous avons reconstitué ces stocks en croisant de nombreuses sources, seules susceptibles de couvrir la totalité des postes de CLC, qui par son exhaustivité intègre des types d'occupation du sol (territoires naturels, forêts gérées, terres agricoles, etc.) qui traditionnellement sont chacun recensés par des institutions différentes (FAO, ONF, chambres d'Agriculture, services statistiques, études spécialisées, ...).

C'est à partir de ce stock de carbone (en CHL) de la végétation que nous estimerons par un ratio et une recherche d'équilibre le taux de glucose réduit en amidon à la fin du cycle végétatif annuel, correspondant au stock d'amidon en début de nouvelle saison végétative. C'est en effet à partir de cet amidon que la végétation hivernale « défoliée » (hormis les plantes à feuilles persistantes) ainsi que les tous jeunes plants et plantes annuelles, incapables de photosynthèse en début de cycle végétatif, vont produire un glucose de « démarrage » permettant le développement de nouvelles branches et feuilles qui prendront le relai photosynthétique de production du glucose.

### 5.3.1.2 Sol : principes de base, nature et source des données

Comment estimer les niveaux relatifs de réduction et d'oxydation du glucose produit à l'échelle d'un territoire ?

Le sol est le meilleur indicateur de fertilité ; pour tous les sols de la planète il existe un niveau spécifique de carbone et d'humus (serait-il nul) qui concentre l'histoire et l'information de tous les cycles biotiques de l'écosystème qu'ils supportent, ou non.

Tout humus est au début un combiné spécifique de CHL et GPL, regroupant l'ensemble des corps morts et déchets du réseau trophique, et qui, selon son rapport carbone/azote (C/N), son humidité, sa température, etc., va entretenir une micro faune plus ou moins importante susceptible de l'oxyder et produire un humus plus ou moins fertile ; et puis qui, selon le type de roche mère, le niveau d'argile et/ou de sable, l'humidité, la granulométrie, etc., du sol inférieur qui le supporte, va produire, grâce notamment aux vers de terre, à l'interface exact entre couche d'humus et sol profond, le complexe dit « argilo-humique », qui deviendra le véritable support d'une fertilité accessible aux plantes.

Si nous examinons le cycle biotique annuel d'un écosystème au regard de la complémentarité des processus de production d'entropie positive et négative, notre équation (37) peut, là encore, particulièrement illustrer, au niveau du sol, le sens très particulier de l'intervention d'une « entropie positive maximale » dans ce cycle de la fertilité ; c'est en effet à partir d'elle, et elle seulement, que la plante va pouvoir exercer, avec plus ou moins de succès, son « libre choix » des éléments nutritifs (information et complexité, paragraphe 2.4.1.5.), seul susceptible d'optimiser sa croissance et sa production primaire d'entropie négative.

Mais nous n'en sommes pas là, et nous n'y viendrons pas dans cette thèse.

Ceci dit, nous pouvons examiner les processus redox de la lithosphère exactement comme nous avons examiné les processus redox de l'écosystème marin de Mondego.

## 5.3.2 Stocks de carbone et diversité structurale du Territoire

Tableau 31 (figure 81) : Stocks de carbone et indices Ka redox du Territoire

Code CLC	Occupation du territoire du PNRPA (CLC 2000)	Hectares	Stocks de carbone (tonnes)				Végétation + sol
			Végétation	Sols			
				Stock oxydé	Stock réduit	Total sol	
111	Tissu urbain continu	65	130	39	287	326	457
112	Tissu urbain discontinu	4.602	46.023	22.091	115.979	138.070	184.094
121	Zones industrielles et commerciales	565	-	-	-	-	-
122	Réseaux routier et ferroviaire et espaces associés	-	-	-	-	-	-
123	Zones portuaires	-	-	-	-	-	-
124	Aéroports	-	-	-	-	-	-
131	Extraction de matériaux	47	-	-	-	-	-
132	Décharges	-	-	-	-	-	-
133	Chantiers	-	-	-	-	-	-
141	Espaces verts urbains	49	976	415	2.025	2.440	3.416
142	Equipements sportifs et de loisirs	160	641	128	1.474	1.603	2.244
211	Terres arables hors périmètres d'irrigation	279	1.393	4.681	12.038	16.719	18.112
212	Périmètres irrigués en permanence	-	-	-	-	-	-
213	Rizières	-	-	-	-	-	-
221	Vignobles	-	-	-	-	-	-
222	Vergers et petits fruits	234	938	3.868	7.854	11.722	12.660
223	Oliveraies	570	3.989	6.839	21.656	28.494	32.483
231	Prairies	2.084	25.012	40.853	105.051	145.904	170.916
241	Cultures annuelles associées aux cultures permanentes	-	-	-	-	-	-
242	Systèmes culturaux et parcellaires complexes	4.411	44.111	98.809	209.968	308.777	352.888
243	Surfaces essentiellement agricoles, interrompues par des espaces natu	1.210	12.099	30.491	54.206	84.696	96.796
244	Territoires agro-forestiers	-	-	-	-	-	-
311	Forêts de feuillus	15.066	1.129.931	632.762	873.814	1.506.575	2.636.507
312	Forêts de conifères	26.335	2.370.152	990.197	1.116.605	2.106.802	4.476.954
313	Forêts mélangées	13.304	731.731	538.820	658.558	1.197.378	1.929.110
321	Pelouses et pâturages naturels	17.699	123.894	433.631	805.314	1.238.944	1.362.839
322	Landes et broussailles	273	4.093	4.585	14.518	19.102	23.196
323	Végétation sclérophylle	1.256	8.789	17.577	45.199	62.777	71.565
324	Forêt et végétation arbustive en mutation	9.115	136.724	204.174	433.871	638.045	774.769
331	Plages, dunes et sable	138	207	304	1.076	1.380	1.587
332	Roches nues	633	-	-	-	-	-
333	Végétation clairsemée	5.734	36.127	96.338	247.727	344.065	380.192
334	Zones incendiées	-	-	-	-	-	-
335	Glaciers et neiges éternelles	-	-	-	-	-	-
411	Marais intérieurs	-	-	-	-	-	-
412	Tourbières	-	-	-	-	-	-
421	Marais maritimes	-	-	-	-	-	-
422	Marais salants	-	-	-	-	-	-
423	Zones intertidales	-	-	-	-	-	-
511	Cours et voies d'eau	80	80	-	-	-	-
512	Plans d'eau	39	-	-	-	-	-
521	Lagunes littorales	-	-	-	-	-	-
522	Estuaires	-	-	-	-	-	-
523	Mers et océans	-	-	-	-	-	-
	Surface totale	<b>103.949</b>	<b>4.677.043</b>	<b>3.126.601</b>	<b>4.727.219</b>	<b>7.853.820</b>	<b>12.530.783</b>
	Moyenne : tonnes carbone/hectare		44,99	30,08	45,48	75,55	120,55
	* L'indice a été calculé non pas sur ces seuls postes CLC, mais pour chacune des 50 communes, pour être ensuite globalisé sur l'ensemble du territoire	<b>Indice Ka*</b>	Redox	Oxydation	Réduction	CHL	<b>0,26816</b>
			<b>0,47148</b>	<b>0,26649</b>	<b>0,19638</b>	GPL	<b>0,31338</b>

Ce tableau présente une synthèse des données concernant les stocks de carbone totaux en masse du territoire, végétation et sols. Au préalable, les stocks ont été calculés pour chacune des 49 communes sur la base de leurs surfaces spécifiques.

Puis nous avons distingué les stocks de carbone réduits et les stocks oxydés.

A partir desquels nous avons calculé, pour chaque commune, les différents indices de *diversité structurale* correspondants. Les indices globaux CHL-GPL du territoire tels qu'ils apparaissent dans le tableau sont ainsi obtenus par un cumul spécifique, et non établis à partir du cumul des surfaces CLC de ce même tableau. Ils seront utilisés dans notre bilan de l'actif du territoire pour établir sa D<sub>ET</sub>.

Notons que ces calculs, quoique précis, furent « empiriques » et ne reflètent pas une réalité constatée sur le terrain ; il en sera donc de même pour les indices.

Comme nous l'avons alors signalé aux responsables du PNRPA lors du rendu final de notre travail de recherche appliquée (Loiret, 2013a), il ferait partie des suites logiques de notre recherche doctorale que de réaliser une campagne d'analyse des différents types de sols des communes du PNR, et de fonder ainsi le bilan spécifique de son actif écologique sur une réalité constatée.

Ceci n'a cependant aucune incidence sur les principes proposés de son calcul. Ces stocks de carbone, rapportés à leur exergie pV, divisée par le volume V standard du territoire, nous permettront d'obtenir la pression standard redox de la matière organique du territoire.

### 5.3.3 Stocks d'exergie pV et $D_{ET}$ ( $D_{ER} + D_{EO}$ ) des communes du Territoire (année n)

Tableau 32 (figure 82) : Stocks d'exergie pV et  $D_{ET}$  du Territoire (année n)

Territoire de référence : Communes du Parc Naturel Régional Préalpes d'Azur (PNRPA - 06) - Données de référence : 2010															Population	Surface (ha)	
Etat standard (masses sèches)															Etat naturel (masses humides)		
© R.Loiret - 2015	M		pV		p	V = pV/p	pV/M	M/V	m	pV.m ***	p2 = p.(m) <sup>2</sup>	V2 = V/m	M2 = M/m	pV/M2	M/V2		
Stocks/flux de carbone du territoire	Etalon CH2O	Masse CH2O	Etalon exergie	Exergie standard du territoire	Etalon pression	Volume CH2O	Exergie massique CH2O	Densité massique CH2O	Indice Ka Des**	DET *** Exergie réelle du territoire	Pression interne CH2O	Volume CH2O	Masse CH2O	Exergie massique CH2O	Densité massique CH2O		
Grammes (gC)	gCH2O/gC	gCH2O	l/g CH2O	Joules (J)	J/m3 = Pa	m3	MJ/kg	Kg/m3	m	J.m ***	J.m /m3 =N/m	m3	gCH2O	MJ/kg	Kg/m3		
<b>Actif écologique</b>																	
<b>(1) Stocks année n</b>																	
pVr										DER							
CHL *	8,74E+12	1,634	1,43E+13	2,82E+04	4,02E+17	2,29E+10	1,76E+07	28,17	813,27	0,26810	1,08E+17	1,65E+09	6,55E+07	5,32E+13	7,55	218,04	
GPL *	3,79E+12	1,476	5,60E+12	3,52E+04	1,97E+17	3,12E+10	6,32E+06	35,23	885,28	0,31361	6,19E+16	3,07E+09	2,02E+07	1,79E+13	11,05	277,64	
pVo										DEO							
Σ	1,25E+13		1,99E+13		5,99E+17		2,39E+07						8,56E+07	7,11E+13			
Moy.					pV	2,51E+10							1,98E+09			8,43	232,07
<small>*CHL = Cellulose, Hemicellulose, Lignine GPL = Glucides, Lipides, Protides **DES = Distance à l'équilibre statistique de la diversité structurale  *** pV.m = Joules.mètre (J.m) = p2 x V2 = DET = Distance à l'équilibre thermodynamique de la diversité biologique = distance de réduction (DER) + distance d'oxydation (DEO)</small>																	

**Note :** On trouvera une version complète et plus lisible du bilan avec l'année n+1

#### Commentaires :

Ce tableau respecte le principe d'énergie constante, puisque l'exergie massique humide moyenne en  $J.kg^{-1}$  ( $8,43 E+3$ ) multipliée par la masse totale humide en kg ( $7,11 E+10$ ) nous donne bien l'exergie pV de base, soit  $5,99 E+17 J$ .

Seuls les Joules.mètre ( $J.m$ ) établissent ainsi la différence entre l'état standard de l'énergie et son état naturel. Ils sont égaux aux Joules standard lorsque l'indice de diversité structurale est égal à 1, ce qui se vérifie pour le diamant organique ( $3.512 kg.m^{-3-1}$ ), qui représente l'état le plus pur du carbone organique. Cas que l'on ne saurait rencontrer dans la lithosphère superficielle (Ecosphère) où, comme nous l'avons vu (paragraphe 3.1.5.2, tableau 15), le Méléze, avec  $1.123 kg.m^{-3-1}$  (à sec) semble connaître la densité massique de réduction la plus élevée que l'on puisse rencontrer.

Ceci pour dire que les  $J.m$  ont vocation à représenter l'utilité réelle de l'exergie dans l'état où les espaces naturels la produisent ; au sens de la « qualité » globale de l'énergie libre incorporée dans la masse organique, vue comme produit essentiel de la Direction de l'évolution. Qualité et utilité de l'exergie qui apparaissent donc comme une fonction directe de la diversité biologique (diversité structurale et fonctionnelle) du territoire, toutes deux intégrées dans et résumées par la fonction pV.m.

Ils représentent cet « ordre » de la nature que par définition la Cité consomme pour construire son ordre interne (et produire du désordre).

Nous verrons quand nous aborderons le Passif écologique combien le « métabolisme économique » consomme lui même l'exergie matérielle dans l'état d'utilité où il la trouve, c'est à dire cet état d'utilité que nous avons mesuré par des  $J.m$  pour les espaces naturels, et non pas dans l'état standard où on la mesure.

Et comment il transforme ensuite, tout au long des processus industriels, le niveau d'utilité de ces  $J.m$  en joules plus utiles et consommables, via l'intervention continue d'autres  $J.m$ , comme ceux des énergies fossiles, eux aussi de plus en plus raffinés pour de plus en plus d'efficacité (comme l'exprime notamment la différence entre PCS et PCI).

Comment ainsi la fonction essentielle de l'économie semble consister à combler la différence entre la  $D_{ET}$  (le niveau d'ordre) les produits récoltés comme tel dans les territoires, et la  $D_{ET}$  des produits prêts à consommer.

Ce qu'elle ne peut se faire qu'en utilisant d'autant plus d'énergie de biomasse et d'énergie fossile que la distance à l'équilibre statistique ( $D_{ES}$ ) du territoire et la  $D_{ET}$  de ses produits est faible !

Ce qui résume bien tout le discours d'Engels face à la théorie de Podolinsky !

Ceci forme bien le cercle le plus vicieux et infernale de l'économie industrielle, puisqu'elle ne cesse de détruire la  $D_{ES}$  des territoires, base première de la  $D_{ET}$ , pour produire une  $D_{ET}$  de consommation toujours plus élevée, en qualité et quantité.

Les  $J.m$  expriment donc bien, face aux joules, le niveau de cette rareté que partout recherchent les partenaires économiques, seule à même d'être comparée avec l'utilité recherchée de ses processus de consommation/production.

Et la différence entre les deux est loin d'être un détail, comme nous le verrons dans nos conclusions relatives à l'actif écologique !

## 5.4 Actif écologique : Partie 2 - Flux d'exergie année $n+1$

Notre objectif est ici de reconstituer, aussi fidèlement que possible, à partir d'un ensemble d'équations synthétiques, une stœchiométrie territoriale annuelle des communes du territoire respectant les principes de conservation de la masse et de l'énergie.

Nous développerons pour ce faire un modèle « stœchiométrique » du territoire (comme il en est des tableaux 4, 5, 7,...), établissant la balance des principaux flux d'exergie qui traversent annuellement le territoire ; ce modèle sera notamment fondé sur les flux annuels de carbone, aujourd'hui classiquement estimés en GPP et NPP<sup>185</sup>.

### 5.4.1 Flux de carbone : Données source et méthode de calcul

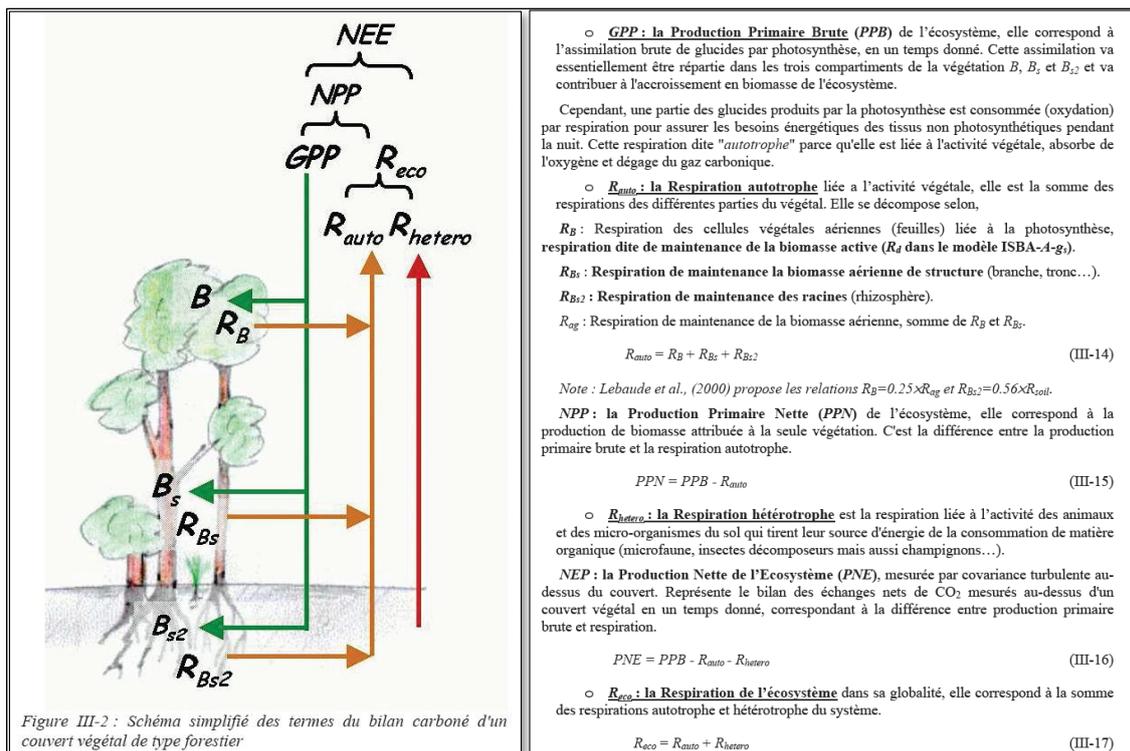
#### 5.4.1.1 GPP et NPP

GPP et NPP sont des mesures conventionnelles largement partagées permettant de caractériser les niveaux de production annuelle de carbone de couverts forestiers, d'écosystèmes ou de territoires naturels de différentes échelles.

---

<sup>185</sup> Notons qu'il n'existe à ce jour aucune méthode permettant d'établir une relation « mesurable » entre GPP et NPP. Raison pour laquelle le satellite MODIS de la Nasa ne nous donne, à l'échelle globale et locale, que les mesures en NPP.

Figure 83 : GPP et NPP d'un couvert végétal, quelques explications



Source : Rivalland, 2003

Depuis trois décennies, certains auteurs ont développé des méthodes « manuelles » de mesure des GPP et NPP à l'échelle de grands écosystèmes et territoires (Odum et autres, 1991 ; Amthor et autres, 1998).

Depuis, de nombreux programmes de recherches internationaux ont été développés pour en préciser automatiquement la mesure, à partir notamment de la « FAPAR » (Fraction of available photosynthetically active radiation), qui permet de déduire la NPP de la pixellisation/numérisation des images satellite.

Et c'est sur ces bases que d'autres auteurs ont développé des bilans précis de la consommation humaine de NPP, ou « HANPP » (Human Appropriation of NPP), à l'exemple de Haberl (Haberl et autres, 2007). Les propositions d'application de la NPP à la mesure de la « valeur des services écosystémiques » se développent ainsi de toutes parts, et nous ne saurions être exhaustifs.

Il en ressort que la NPP est un outil très fiable et utile aux « bilans carbone », car sa mesure aujourd'hui standardisée permet la comparaison de tous les territoires.

Mais la NPP comporte pourtant plusieurs limites au regard de notre problématique globale.

#### 5.4.1.2 Limites de la GPP et de la NPP

Il apparaît tout d'abord que, si on sait parfaitement mesurer la respiration des cellules végétales aériennes en chambre isolée, ces techniques ne permettent pas de mesurer, en dehors de logiciels spécialisés très complexes à mettre en œuvre, les autres niveaux de respiration (des branches, du tronc, des racines, ...) des autotrophes ; et donc ne permettent pas d'accéder simplement à des bilans globaux de respiration des autotrophes ; et par conséquent d'établir une relation fiable entre GPP et NPP d'un

écosystème, puisque cette dernière est égale à la GPP moins la respiration autotrophe. Et sans cette relation, pas de bilan, notamment redox.

La GPP d'autre part, et bizarrement, n'intègre pas le concept de réduction « en amont ». C'est à dire la capacité des autotrophes à d'abord réduire le gaz carbonique et l'eau en glucose, avant de le transformer lui-même en CHL et GPL, une fois seulement qu'ils ont réduit primitivement.

Elle induit certes une respiration autotrophe, de laquelle sera déduite la NPP, mais elle n'inclut aucune réduction autotrophe, comme si la cellulose et la lignine n'existaient pas ! Ce qui voudrait dire que la NPP ne serait produite « que » par respiration, sans inclure donc les processus stœchiométriques très différents de réduction des CHL à partir de la GPP. On comprend mieux que leurs concepteurs aient tant de mal à établir des relations cohérentes entre GPP et NPP, cette dernière mesure étant on l'a vu bien appréciée.

Mais il y a plus. Certains auteurs ont cherché à utiliser la NPP pour estimer l'actif (biocapacité) des écosystèmes, et à travers elle d'intégrer la biodiversité au sein des calculs d'empreinte écologique selon le GFN (Haberl, Wackernagel et autres, 2004 ; Siche et autres, 2007).

Mais ces tentatives ne furent pas probantes. La NPP est fondée sur la seule production de carbone. Et si Odum (1986, 1991, 1996) a établi une relation directe entre GPP, NPP et énergie d'un écosystème, cette relation n'est que propre au carbone, elle ne saurait nous donner l'intensité énergétique et la  $D_{ET}$  d'un écosystème.

Citons quelques raisons :

- Le carbone n'est qu'un parmi les principaux constituants des molécules et tissus organiques (cf. nos équations stœchiométriques). Il ne saurait donc nous donner leur niveau d'exergie et tracer par là même la directionnalité des tissus d'un écosystème. Nous retrouvons ici les composantes de notre problématique vitale et les solutions que nous avons testées à Mondego. Le carbone seul ne saurait nous donner le niveau d'information que nous donne l'exergie CHL-GPL.

- Le carbone ne nous dit donc rien en soi du niveau de pression interne de l'énergie à l'intérieur des différents organismes et/ou écosystèmes, et donc de leur productivité effective, en pression (densité énergétique) ou densité massique.

- Le carbone ne nous dit rien du taux d'humidité des tissus organiques, donc de l'énergie utile (PCS, PCI, ...) de ces tissus, seule utilisée par les techniques économiques.

Pour toutes ces raisons, la NPP ne nous renseigne enfin que partiellement sur les émissions réelles de  $CO_2$  lors de la respiration d'un écosystème, sur la production d'oxygène et sur les flux d'eau « interne » des matières carbonées du territoire. Dans la production de CHL et de GPL, le niveau respiratoire (production d'entropie -  $CO_2$ ) peut varier entre 1 et 10 par kg de carbone.

Ainsi la NPP ne nous dit rien de l'« utilité » de l'énergie produite par un territoire !

Mais elle nous offre cependant une « base de calcul », homogène et comparable pour tous les territoires, qui va nous permettre d'établir leur stœchiométrie simplifiée, et avec elle le bilan de l'actif tel que nous le proposons.

#### 5.4.2 Flux de carbone : NPP du Territoire

Nous avons calculé le bilan NPP du PNRPA, année 2000, avec l'outil mis au point par la NASA, sur fond de données fournies par le satellite « MODIS ». Nous avons dans le même temps calculé la NPP pour d'autres territoires afin d'établir un référentiel.

Tableau 33 (figure 84) : NPP des espaces naturels du Territoire et référentiel

NPP 2000	Jours/ mois	PNRPA		Moyenne mondiale		Maximum forêt tropicale		Maximum absolu		
		g.m-2.j-1	g.m-2.mois-1	g.m-2.j-1	g.m-2.mois-1	g.m-2.j-1	g.m-2.mois-1	g.m-2.j-1	g.m-2.mois-1	
1	01/01/00 - 01/02/00	31	0,73	22,70	0,76	23,68	7,00	217,00	7	217,00
2	01/02/00 - 01/03/00	28	1,20	33,73	0,73	20,50	6,62	185,42	7	196,00
3	01/03/00 - 01/04/00	31	2,40	74,45	0,83	25,63	6,28	194,54	7	217,00
4	01/04/00 - 01/05/00	30	4,04	121,18	1,02	30,47	4,61	138,19	7	210,00
5	01/05/00 - 01/06/00	31	3,79	117,41	1,36	42,23	5,24	162,32	7	217,00
6	01/06/00 - 01/07/00	30	4,23	126,85	1,93	57,87	5,11	153,31	7	210,00
7	01/07/00 - 01/08/00	31	1,46	45,16	1,90	58,83	4,80	148,65	7	217,00
8	01/08/00 - 01/09/00	31	2,12	65,66	1,58	49,06	5,93	183,80	7	217,00
9	01/09/00 - 01/10/00	30	2,53	75,83	1,05	31,42	6,46	193,94	7	210,00
10	01/10/00 - 01/11/00	31	2,31	71,52	0,83	25,63	6,46	200,40	7	217,00
11	01/11/00 - 01/12/00	30	1,02	30,47	0,76	22,91	4,76	142,91	7	210,00
12	01/12/00 - 01/01/01	31	0,67	20,75	0,73	22,70	7,00	217,00	7	217,00
NPP annuelle		g.m-2.an-1	<b>805,71</b>			<b>410,94</b>		<b>2137,49</b>		<b>2555,00</b>
Surface		hectares	103.949	Source : Nasa Earth Observatory, MODIS						
NPP totale PNRPA		g.m-2.an-1	<b>8,38E+11</b>	<a href="http://daac.ornl.gov/MODIS/MODIS-menu/modis_webservice.html">http://daac.ornl.gov/MODIS/MODIS-menu/modis_webservice.html</a>						

Sur ces bases, nous avons, avec notre stœchiométrie territoriale, reconstitué la GPP et la totalité des flux entrant du territoire ainsi que leur transformation.

### 5.4.3 Stœchiométrie territoriale : Méthodologie générale

Notre objectif méthodologique, en nous fondant sur l'exemple élémentaire du tableau 7, est de reconstituer, aussi fidèlement que possible, à partir d'un ensemble d'équations synthétiques, une stœchiométrie respectant les principes de conservation de la masse et de l'énergie à l'échelle d'un territoire naturel.

De cela apparaîtra ainsi une densification énergétique de forme  $d(pV)$  (38), vérifiant pour un territoire la direction de l'évolution et le principe biogéochimique d'accumulation énergétique ; ceci tout en restant conforme au second principe de la thermodynamique, c.à.d. en mettant en valeur, dans un sens ou l'autre, à  $pV$  constant, soit une agrégation, soit une « disgrégation » de l'énergie.

Ce que Clausius admettait parfaitement, sauf à considérer qu'au final l'entropie l'emportait toujours (cf. paragraphe 2.1.6.4.).

#### 5.4.3.1 Des stocks de carbone aux flux végétatifs de croissance

Nous avons pu étudier les différences d'approche concernant la mesure des diversités structurales et fonctionnelles d'un écosystème marin homogène et d'un grand territoire diversifié.

Avec Mondego, nous avons des espèces, leur masse spécifique puis leur exergie CHL-GPL, dont nous avons tiré nos indices redox pour les conjuguer avec leur exergie totale et massique et obtenir la  $D_{ET}$  redox des placettes.

A grande échelle, nous procéderons à l'inverse pour reconstituer les échanges de l'écosystème.

Nous ne partirons plus de telle exergie CHL-GPL pour obtenir telle diversité différentielle redox et tels flux d'exergie biogéochimique, mais, de telle diversité différentielle redox pour obtenir telle exergie CHL-GPL et tels flux d'exergie biogéochimique (dans telles conditions climatiques).

Nous pouvons résumer cela à quelques mots très simples : *Si tel lot d'organismes suppose telle diversité biologique redox et tels flux, il semblerait logique que telle diversité biologique redox suppose tel lot d'organismes et tels flux.*

Nous avons ainsi mis en œuvre un principe selon lequel la diversité redox des stocks d'exergie géochimique d'un territoire, comme « mémoire » de la direction de l'évolution suivie par sa diversité biologique, engendre, dans telles conditions climatiques, une même diversité redox de ses flux d'exergie biogéochimique annuels, et inversement.

Ce dont les biogécénoses, qui prennent en compte le socle biogéochimique (la pédologie) des écosystèmes, sont les premières à rendre compte.

Principe qui suppose en somme, comme il en est d'un organisme, une reproduction globale de la diversité de l'écosystème identique à elle-même, sauf une intensité des flux de croissance dépendant des conditions climatiques.

Ainsi se trouve positionnée, entre stocks et flux d'un écosystème la notion de croissance, avec des flux de CO<sub>2</sub> et de H<sub>2</sub>O directement transformés en croissance de stocks de CH<sub>2</sub>O déjà existant.

Un exemple typique que nous verrons dans notre synthèse stœchiométrique (tableau 34) est celui de l'amidon. S'agit-il en effet d'un stock ou d'un flux ? Ou ne serait-ce pas plutôt un flux stocké en forme de potentiel de croissance ?

Nous sommes ainsi partis du principe selon lequel les masses spécifiques de carbone du territoire reflétaient le taux global de réduction/oxydation de sa chaîne trophique, après transformation de l'amidon en glucose et/ou photosynthèse.

L'hypothèse générale retenue étant que les flux de croissance de la végétation d'un écosystème non contrôlé par l'homme reproduisent, années après années, le modèle de répartition CHL/GPL de tous les stocks de carbone redox de cet écosystème, répartition réduction/oxydation qui est une fonction directe de sa diversité biologique, comme a tendu à nous le montrer l'exemple des placettes de Mondego.

Dans toute l'Ecosphère, les autotrophes connaissent un processus primaire de réduction du glucose qui est une proportion directe du niveau de carbone de leur végétation. Tous les organismes, autotrophes comme hétérotrophes, développeront à la suite des processus redox secondaires, propre à chacun, qui caractériseront le métabolisme de la chaîne trophique d'un écosystème particulier.

Et comme l'ensemble des organismes de cette chaîne trophique se retrouveront, sauf exceptions (les cigognes,...), un jour ou l'autre dans le sol de cet écosystème, naturel, son sol et ses différentes couches de matière carbonée sont donc supposés refléter à long terme ses processus redox spécifiques.

#### 5.4.3.2 Eléments de stœchiométrie territoriale

La qualité première des équations stœchiométriques est de prendre en compte, dans leur indissociable unité fonctionnelle, les flux de matières de la production environnementale les plus directement opposables aux consommations et pollutions les plus significatives de

l'économie industrielle : gaz carbonique, eau (interne), carbone, matières carbonées (et futures énergies fossiles), oxygène, énergie libre de Gibbs et exergie.

Leur qualité seconde est de représenter, à la différence de masse près, une réalité des transformations biogéochimiques valable depuis l'échelle moléculaire jusqu'à l'échelle planétaire ; ces équations sont donc susceptibles de nous guider pour établir l'équilibre global entrée/sortie des transformations.

Comme pour une équation élémentaire, la condition première de notre stœchiométrie territoriale sera ainsi que toutes les entrées de matière et d'énergie, au long du cycle redox de croissance annuelle, soient égales à toutes les sorties, en passant par toutes les transformations intermédiaires nécessaires.

Un système d'équations établi sur de telles bases formera dès lors une « matrice de structure » à partir de laquelle nous pourrions agréger tous types de bilans spécifiques, en stock et flux, de matières, organiques et biogènes, susceptibles de traverser et pénétrer l'écosystème.

Ainsi par exemple d'un bilan hydrique, non plus en termes de transformations moléculaires (production/consommation d'eau interne des molécules), mais en termes de flux d'eau (externes) le traversant. Il nous semble que la première appréciation de l'« utilité » de l'eau dans tout écosystème serait d'estimer en quoi exactement elle participe de sa directionnalité globale.

Participation de l'eau que notre bilan des stocks d'actif a permis d'estimer en établissant la différence entre masse sèche et masse humide de  $\text{CH}_2\text{O}$ , et ce que notre bilan des flux complètera.

Ceci pourra s'étendre jusqu'aux réseaux trophiques de l'écosystème, dont la masse globale et l'énergie pourront s'agglomérer à la matrice de structure du bilan, sauf à faire évoluer à la marge la production d'entropie (respiration) de l'écosystème.

C'est en partant de ce principe que lorsque nous parviendrons au bilan écologique global comparant actif et passif, nous pourrions élargir les flux élémentaire de la stœchiométrie territoriale à la prise en compte potentielle de l'ensemble des flux de polluants chimiques, avec leur incidence sur la  $D_{\text{ET}}$  globale de la Biosphère et de ses compartiments.

Ceci en établissant les rapports entre entrées-sorties de la nature et entrées-sorties de l'économie, à partir notamment de matrices « Input-Output » (TES, Leontief, 1973).

Mais nous n'en sommes pas là !

### 5.4.3.3 Principes généraux de calcul de la $D_{\text{ER}}$ et de la $D_{\text{EO}}$ des flux

Nous avons procédé à l'inverse de nos calculs pour Mondego, en deux phases distinctes :

- Tableau de stœchiométrie territoriale : Pour caractériser les flux d'exergie CHL-GPL, nous avons appliqué des coefficients de réduction et d'oxydation permettant d'obtenir une répartition des flux de transformation du glucose (GPP entrant) en amidon, CHL et GPL reproduisant le modèle de répartition des stocks de  $\text{CH}_2\text{O}$  du territoire, et donnant la NPP estimée par la NASA (tableau 33) à moins d'un pourcent près.

- Bilan de l'actif (stocks + flux) : Nous avons ensuite appliqué les indices  $K_a$  de réduction et d'oxydation des stocks de  $\text{CH}_2\text{O}$  (tableau 31) aux flux de  $\text{CH}_2\text{O}$  pour obtenir la conjugaison  $pV.m$  spécifique aux flux ainsi que les variations annuelles de  $D_{\text{ER}}$  et de  $D_{\text{EO}}$ .

#### 5.4.3.4 Précisions sur la GPP et la NPP dans le tableau stœchiométrique

Comme nous l'avons déjà signalé plus haut, la GPP n'intègre pas le concept de réduction « en amont ». C'est à dire la capacité des autotrophes à d'abord réduire le gaz carbonique et l'eau en glucose, avant de transformer ce dernier en CHL et GPL.

Or cette notion de réduction a priori est très importante, car elle implique pour les autotrophes un double processus de réduction, d'abord de nature autotrophique pour le seul glucose, puis (associée à une oxydation) de nature hétérotrophique pour la transformation du glucose en CHL et GPL. Ceci suppose un stockage intermédiaire du glucose, sous forme d'amidon, qui servira de glucose de « démarrage » de la végétation une fois que les conditions climatiques seront établies, avant même que le feuillage (et avec lui la photosynthèse) ne soit développé, et pour le développer.

La GPP, dans nos calculs, sera ainsi constituée de deux parties, même si pour des raisons d'affichage nous ne les avons pas différenciées dans notre tableau de synthèse :

- La partie de la GPP produite par déstockage printanier de l'amidon, qui a été réduite par photosynthèse puis stockée l'année précédent l'année de référence.
- La partie de la GPP produite par photosynthèse l'année de référence.

La NPP étant de même constituée de deux parties, distinguées dans notre tableau :

NPP<sub>R</sub> : La partie de la NPP obtenue par réduction de la GPP globale.

NPP<sub>O</sub> : La partie de la NPP obtenue par oxydation de la GPP globale.

Le lecteur attentif pourra cependant nous rétorquer que nous connaissons la NPP (tableau 33), mais pas la GPP, et que l'on ne voit pas comment nous pouvons baser nos calculs sur la GPP.

Notre inversion du procédé de calcul intervient ici une seconde fois. Un tableau Excel intégrant des équations stœchiométriques à rapports constants nous aura permis, par approches successives ou par programmation linéaire (solveur Excel), de trouver la GPP correspondant à la valeur connue de la NPP.

Avec une condition première de la reproduction des cycles biotiques : que le stock d'amidon de restockage soit au moins égal au stock d'amidon déstocké en début de végétation.

Ce que l'on pourra vérifier dans le bilan des entrées/sorties de notre tableau de synthèse.

#### 5.4.4 Stœchiométrie territoriale : Résultats

Le tableau 34 page suivante nous présente le système de calcul de la stœchiométrie annuelle du territoire naturel, vue comme une représentation simplifiée de l'ensemble des échanges biogéochimiques parcourant ce territoire, avec leurs diverses incidences en termes de bilan, de CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, O<sub>2</sub>, exergie,...

Ainsi porté à l'échelle d'un espace naturel, ce système d'équations synthétise ses échanges productifs et caractérise l'unité fonctionnelle des différents types de matières et organismes concourant ensemble à sa croissance végétative.

Ceci quand ils sont généralement étudiés distinctement les uns des autres (bilan CO<sub>2</sub>, bilan carbone, bilan hydrique, bilan énergétique, diversité biologique, ...).

C'est un bilan *thermodynamique* de l'accumulation énergétique  $d(pV)$  (38), en ce sens qu'il rend compte d'une intensification énergétique du territoire, à masse et énergie constante, et d'une augmentation de sa distance à l'équilibre thermodynamique.

Il nous permet d'aborder dans une dimension globale de l'analyse environnementale l'étude des processus redox de la diversité structurale et fonctionnelle concourant à la production d'énergie biogéochimique des organismes vivants, et à la reproduction/croissance de la diversité biologique.

Soit les processus redox produisant cet « ordre » de l'Ecosphère dont se nourrissent directement les structures dissipatives de l'Anthroposphère.

[Tableau 34 \(figure 85\) : Stœchiométrie annuelle du Territoire - Synthèse](#)

(Ce tableau est présenté page suivante)



### Commentaires :

Ce tableau se lit de gauche à droite en suivant les différents stades de la croissance végétative. On y retrouvera les principes fondamentaux de la stœchiométrie élémentaire d'une molécule, mais étendus à l'échelle du territoire, en distinguant la stœchiométrie en masse de celle mesurée en énergie, qui en ce sens nous donne un bilan thermodynamique (énergie constante) ; le rapport entre les deux pouvant être établi tout au long des transformations, comme il en est de l'intensification énergétique en bas du tableau, par le rapport entre l'accumulation énergétique et l'accumulation massique.

Un commentaire important concerne la GPP et la NPP. Ce tableau nous donne non seulement leur rapport, en général inconnu, et sinon très difficilement calculable, mais surtout la masse et l'exergie totales de la matière organique (à l'état standard) de ce flux de carbone, pour la partie réduite et oxydée, ce que la NPP ne saurait nous donner.

Ce tableau a ainsi le caractère d'une matrice entrées/sorties (Input/Output table) qui fait plus qu'un simple inventaire puisqu'elle caractérise une transformation aboutissant sur la production de matière organique constituée, avec les matières biogènes et biogéochimiques correspondantes, en entrée et sortie.

Ses résultats nous donnent à droite la croissance annuelle nette de l'actif écologique du territoire en exergie pV, qu'il nous restera encore au niveau du bilan spécifique à l'actif, à subdiviser en volume et pression, puis transformer en Joules.mètre ( $J.m$ ) et en  $D_{ET}$ .

L'avantage d'un bilan ainsi rapporté à une stœchiométrie, c'est d'être tout aussi bien *écologique*, dans le caractère global que nous demande cette appréciation de caractère scientifique (penser globalement), qu'*environnemental* dans le caractère détaillé des évaluations que nous demande cette approche plus technique (agir localement).

Il nous donne ainsi, en variation annuelle, un « Actif écologique global », agrégé et agrégeable à toutes échelles, en même temps qu'une image détaillée de nos « actifs environnementaux », pour les matières biogènes et organiques les plus essentielles de ce qui constitue la santé des territoires et des hommes, ainsi que de ce qui alimente leur travail économique.

Au détail, ces actifs environnementaux seront ainsi directement opposables, poste à poste, aux différents « passifs environnementaux » des activités de production/consommation et pollution de l'Anthroposphère correspondante qui, dans ce cas de Parc Naturel Régional, concerne la population de ses 49 communes rurales et urbaines.

Notamment en ce que ces communes consomment de chacune de ces matières biogènes et organiques, ou des territoires naturels qui les produisent (changement d'occupation ou urbanisation des sols), et en ce qu'elles rejettent dans ces territoires naturels en terme de pollution chimique et déchets, chimiques et organiques.

Au global, comparable avec celui d'autres territoires, cet Actif écologique, opposé ou non au Passif écologique correspondant, prendra un caractère plus écologique de bilan de biodiversité, agrégeable de territoires en territoires.

Il nous offrira ici, comme le suggérait la CBD (2010), un cadre conceptuel général de mesure des échelles spatiales et temporelles de la biodiversité, telle que configurée à travers les paysages, ainsi que de mesure de sa dégradation.

Les flux ayant été ainsi estimés, nous pourrons maintenant établir le Bilan de l'Actif écologique de l'année  $n+1$ , dans un tableau de synthèse, où nous passerons, comme dans l'exemple du tableau 7, de la simple dimension horizontale de l'exergie totale et massique, aux dimensions volumiques des densités massiques ( $kg.m^{3-1}$ ) et énergétiques ( $J.m^{3-1}$ ).

## 5.5 Actif écologique : Partie 3 - Stocks année n + 1

Territoire de référence : Communes du Parc Naturel Régional Préalpes d'Azur (PNRPA - 06)											Surface (ha)	Population	
Année de référence : 2000											103.949	100.164	
Etat standard (masses sèches) de la biomasse (CH <sub>2</sub> O)						Etat naturel (masses humide) de la biomasse (CH <sub>2</sub> O)							
© R.Loiret - 2015	M	pV	p	V = pV/p	Em = pV/M	m	pV.m ****	p2 = p.m	V2 = V/m	Em2 = Em.m	M/V2		
Stocks/flux de carbone du territoire	Masse	Exergie standard du territoire	Etalon pression	Volume standard	Exergie massique standard	Indice K <sub>a</sub> D <sub>ES</sub> ***	D <sub>ET</sub> **** Exergie utile	Pression moyenne	Volume humide	Exergie massique moyenne	Densité massique CH <sub>2</sub> O		
grammes (gC)	grammes	Joules (J)	J/m3 = Pa	m3	KJ/g	m	J.m ****	J/m3	m3	KJ/g	Kg/m3		
<b>Actif écologique</b>													
<b>(1) Stocks année n</b>													
pVR						DER							
CHL *	8,74E+12	1,43E+13	4,02E+17	2,29E+10	1,76E+07	28,17	0,26810	1,08E+17	6,14E+09	6,55E+07	7,55	218,04	
GPL *	3,79E+12	5,60E+12	1,97E+17	3,12E+10	6,32E+06	35,23	0,31361	6,19E+16	9,78E+09	2,02E+07	11,05	277,64	
pVo						DEO							
Σ	1,25E+13	1,99E+13	5,99E+17		2,39E+07			1,70E+17		8,56E+07			
Moy.	pV		2,51E+10			DET		7,00E+09			8,43	232,07	
<b>(2) Variation de stock = Flux de production de l'Ecosphère année n+1</b>													
NPPR			d(pV)R **			ΔDER							
CHL	5,86E+11	9,58E+11	2,70E+16	2,29E+10	1,18E+06	28,17	0,26810	7,23E+15	6,14E+09	4,39E+06	7,55	218,04	
GPL	2,54E+11	3,33E+11	1,33E+16	3,12E+10	4,26E+05	39,88	0,31361	4,17E+15	9,78E+09	1,36E+06	12,51	245,30	
NPP0			d(pV)0 **			ΔDEO							
Σ	8,40E+11	1,29E+12	4,03E+16		1,60E+06			1,14E+16		5,75E+06			
Moy.	NPP		d(pV)		2,51E+10	ΔDET		7,00E+09			8,69	224,48	
<b>(3) Stocks année n+1</b>													
pVR						DER							
CHL	9,32E+12	1,52E+13	4,29E+17	2,29E+10	1,87E+07	28,17	0,26810	1,15E+17	6,14E+09	6,99E+07	7,55	218,04	
GPL	4,05E+12	5,93E+12	2,11E+17	3,12E+10	6,75E+06	35,49	0,31361	6,60E+16	9,78E+09	2,15E+07	11,13	275,60	
pVo						DEO							
Σ	1,34E+13	2,12E+13	6,40E+17		2,55E+07			1,81E+17		9,14E+07			
Moy.	pV		2,51E+10			30,22	DET		7,00E+09			8,45	231,59
*CHL = Cellulose, Hemicellulose, Lignine GPL = Glucides, Lipide ** Résultats de la <b>Stoichiométrie territoriale</b> *** DES = Distance à l'équilibre statistique de la diversité structurale													
**** pV.m = Joules.mètre (J.m) = DET = Distance à l'équilibre thermodynamique de la diversité biologique = distance de réduction (DER) + distance d'oxydation (DEO)													

Tableau 35 (figure 86) : Actif écologique du Territoire - Synthèse

(Ce tableau est présenté page précédente)

**Premiers commentaires :**

Ce tableau de synthèse de l'Actif écologique applique les formules relatives à  $pV$  (37) et à sa variation  $d(pV)$  (38).

Mais pour cette version de l'actif, qui servira au bilan écologique « fonctionnel » du Territoire (version A du bilan), nous ne faisons pas fait apparaître toutes les contreparties, relatives à l'atmosphère, que l'on trouve dans le **tableau 34**, qui rendent compte des principes de conservation de la masse et de l'énergie ( $pV$  constant), toutes les entrées de la variation de stock étant égales aux sorties.

Elles apparaîtront dans la version B (stœchiométrique) du bilan, qui reprendra le concept de stœchiométrie territoriale (et avec elle de bilan thermodynamique), mais cette fois dans un volume global intégrant la comparaison actif/passif avec tous leurs effets cumulés relatifs aux compartiments de l'Ecosphère, et à la variation globale de leur  $D_{ET}$ .

Ceci supposera une stœchiométrie « urbaine » du passif opposable à l'actif écologique, dont nous déduisons une variation globale de la  $D_{ET}$  de l'Ecosphère (du Territoire), que nous pourrons voir comme un diagnostic des impacts de l'Anthroposphère, potentiellement extensible à un diagnostic global de l'Anthropocène, depuis l'aube la révolution industrielle, sur l'environnement global et la biodiversité des territoires.

Nous avons voulu à ce stade mettre particulièrement en valeur la notion de Joules.mètre, en stock et en flux de variation.

Elle correspond à l'exergie « utile » du Territoire, sur laquelle nous reviendrons lors de l'établissement du bilan fonctionnel.

Pour chaque élément CHL et GPL des stocks et des flux, les  $J.m$  sont égaux à l'exergie standard  $x$  par la  $D_{ES}$  spécifiques, sachant qu'ils vérifient par ailleurs la conservation de l'énergie totale puisque pour chacun de ces mêmes éléments, l'exergie massique moyenne  $x$  par la masse humide reste égale à  $pV$ .

Ceci dit, la différence entre  $pV$  et  $pV.m$ , exprimée en  $J.m$ , devient très significative.

Nous verrons en effet, quand nous aurons établi le passif (flux annuels) du Territoire, que, quand leurs populations consomment à priori, en produits de biomasse, environ 10 % de la production annuelle de biomasse terrestre, en joules, du territoire, elles consomment en réalité environ 36 % de sa production de « fertilité », ou de diversité biologique totale en  $J.m$  (sans faire à ce stade la différence entre consommation de CHL et GPL).

Car l'économie, dès l'entrée de ses processus agricoles et industriels, ne consomme l'exergie de ses matières premières que dans l'état naturel où elle les trouve, en volumes et pressions humides, c.à.d. une exergie en  $J.m$ , et non pas en joules. Et c'est tout au long de ses processus de production qu'elle consacre ensuite une grande part de ses techniques à l'augmentation de la productivité de ces matières naturelles, grâce aux énergies fossiles, dont la productivité à l'état brute a été elle-même intensifiée grâce à d'autres énergies fossiles ; et ce jusqu'à ce qu'elles rendent le maximum de leur énergie interne.

Il existe bien ainsi une direction de l'évolution économique tout comme il existe une direction de l'évolution des écosystèmes.

Mais oh combien plus coûteuse !

Ainsi le bilan fonctionnel du Territoire empirera terriblement quand nous ajouterons les consommations additionnelles du passif (directes et indirectes) à la consommation primitive de biomasse.

Nous arriverions en effet à une consommation totale (directe et indirecte) du passif qui dépassera plus de 3 fois la production de *J.m* du Territoire, avec leurs contreparties en consommation d'oxygène atmosphérique, production de CO<sub>2</sub>, etc.

Nous retrouvons ici le constat qu'établissait le **tableau 2** sur l'évolution de l'agriculture française qui, entre 1870 et 1970, a vu sa productivité énergétique globalement divisée par 20.

Et ceci alors que nous sommes sur un territoire naturel, relativement productif en services écosystémiques, avec près d'un ha de surface naturelle productive par habitant.

Qu'en sera t-il pour un département comme les Alpes-Maritimes, qui en 2000 avaient une population d'à peine plus d'un million d'habitants, pour un territoire de 430.426 ha, dont 59.183 ha improductifs (zones urbaines, routes,...) ?

Toutes choses qui nous donnent une toute première idée de ce que pourraient donner les résultats potentiels d'un bilan écologique d'échelle nationale, ceci quand la France est un territoire tout particulièrement productif sur le plan des écosystèmes, naturels et gérés !

## .Chapitre VI. **Passif(s) écologique(s)**

*Le **chapitre VI** a pour objectif de développer les principes méthodologiques simplifiés de calcul du Passif écologique, de l'échelle nationale à l'échelle territoriale, puis de les appliquer aux collectivités urbaines (communes) du Territoire.*

*Il présente et met en œuvre les principes généraux d'une méthodologie simplifiée intégrant l'établissement du Passif écologique national et sa désagrégation à l'échelle du Territoire. Celle-ci se fonde sur un tableau entrées/sorties (TES) monétaire national agrégé, à 14 postes, et l'établissement de son reflet matériel, un TES14 biophysique complet (industries et ménages) représentant le Passif écologique national, pour ensuite les désagréger tous deux à l'échelle du Territoire.*

*De nombreuses extrapolations sont tirées des passifs écologiques nationaux et territoriaux, dont une stœchiométrie urbaine.*

## 6.1 Le **Passif** *écologique* : Présentation générale et signification

### 6.1.1 Présentation

Relativement aux concepts thermodynamiques et stœchiométriques abordés au long de notre thèse, le **Passif** *écologique* représente d'une manière générale le désordre généré par la consommation d'ordre de la cité, soit une transformation de sens inverse à celle de notre stœchiométrie territoriale (tableau 31).

Ce qui était bien la conception de Clausius quand il écrivait :

Si dans tous les changements d'état qui se produisent dans l'univers, les transformations effectuées dans un certain sens surpassent celles qui se produisent en sens contraire, il faut que l'état de l'univers se modifie de plus en plus dans le premier sens, c'est à dire qu'il tende de manière continue vers un état limite [Clausius, 1865:399].

Notre objectif étant d'établir un tel bilan des transformations effectuées dans les deux sens, depuis l'échelle locale jusqu'à l'échelle globale des territoires, sachant qu'en l'état actuel du développement économique, la tendance suit d'évidence la conclusion de Clausius.

Plus concrètement, le passif d'une collectivité territoriale comptabilisera les *flux annuels* de consommation et transformation d'exergie de sa population urbaine, qui incluent, de l'Anthroposphère à la cité, les consommations intermédiaires du système économique de production/transformation et les consommations finales de la population des ménages.

C'est à dire l'exergie des matières minérales et organiques consommées, sous quelque forme et de quelque nature qu'elles soient, provenant des compartiments AHL (atmosphère, hydrosphère et lithosphère) de l'Ecosphère et de la Biosphère, telles qu'elles sont produites annuellement et/ou sont accumulées dans les diverses strates de ces compartiments.

Et ceci y compris les résidus organiques et chimiques de ces transformations, tous caractérisés par une intensité énergétique (pression) spécifique fondant le type d'impact sur les compartiments AHL qu'ils sont susceptibles d'engendrer.

Sous un angle purement théorique, le passif tel que nous le concevons est ainsi susceptible d'inclure toutes les transformations chimiques et biogéochimiques participant du processus économique selon une métrique cohérente, uniforme et continue.

La seule réserve étant la disponibilité du personnel en charge de le réaliser, les capacités du système de calcul et la disponibilité de données cohérentes, à toutes les échelles.

### 6.1.2 Signification

Nous avons développé au long de cette thèse une introspection de la conjugaison pV telle que les pères de la thermodynamique la concevaient, que ce soit intégrée dans la fonction d'état Enthalpie (16), ou vue en elle-même (33).

Puis nous avons pu constater que l'exergie est sa meilleure expression, jusqu'à construire en prenant l'exemple du glucose, un tableau stœchiométrique simplifié nous permettant de mettre en exergue la variabilité de ses composantes p et V, à exergie pV constante (tableau 7).

Comme nous l'avons abordé dans nos conclusions de la deuxième partie, il existe un travail de millions de millénaires des forces de la Nature qui, sur le plan thermodynamique, semble tout entier se résumer dans la montée en pression directionnelle (et la variation consécutive de volume) de l'exergie biogéochimique de la matière organique, relative au développement des écosystèmes et de la biodiversité.

Avec sa contrepartie dans la production d'exergie géochimique biogène de l'atmosphère, avec ses composantes p et V spécifiques.

L'exergie, en forme de volumes spécifiques de pression spécifique, remplit ainsi la quasi totalité des compartiments AHL de l'Ecosphère (et pour partie ceux de la Biosphère), et se distribue depuis les couches les plus élevées de la troposphère (après ?!), jusqu'aux plus profondes de la lithosphère.

Où elle génère une diversité différentielle des masses de composés géo et biogéochimiques, à l'intérieur de ces compartiments, et entre ces compartiments.

Or nous savons mesurer l'exergie géochimique sous les diverses formes où elle est produite et se présente (Szargut & Valero, 2005 ; Valero, 2008), et nous avons proposé pour notre part une unité et un système de mesure de l'exergie biogéochimique.

Nous serions donc en capacité de la mesurer sous les diverses formes où elle est puisée dans les compartiments AHL et consommée par l'économie.

Il devient dès lors envisageable de recomposer, à partir des grandes catégories (postes) de notre consommation, *une stœchiométrie urbaine* (ou de l'Anthroposphère) en masse et énergie, de sens inverse à la *stœchiométrie territoriale* des flux annuels de l'actif, agrégeant les composantes majeures de nos flux annuels de consommation d'exergie.

A partir de celle-ci nous pourrions *dans un premier temps*, à l'échelle du territoire considéré, opposer ces postes de consommation d'exergie pV aux postes de leur production (actif écologique). Ceci en les ramenant à une variation de pression p et de volume V, à pV constant, des compartiments AHL de l'Ecosphère (échelle locale) et de leurs composantes géochimiques et biogéochimiques.

Un indicateur de synthèse sera ainsi obtenu qui résumera, à pV constant, une *grande partie* des impacts de l'Anthroposphère sur l'Ecosphère par la variation (négative) de pression et (positive) de volume induite par ces consommations.

Et ceci face à leur variation (positive) de pression et (négative) de volume induite par la production d'exergie biogéochimique (variation annuelle de l'actif écologique).

Comme l'écrivait Georgescu Roegen dans notre citation introductive :

Quelques économistes ont relevé que l'homme ne peut ni créer ni détruire de la matière ou de l'énergie, vérité qui découle du *principe de conservation de la matière-énergie*, autrement dit du premier principe de la thermodynamique. Cependant nul ne paraît avoir été frappé par la question, si troublante à la lumière de cette loi : « Que fait alors le processus économique ? » [...] La réponse à la question sur ce que fait le processus économique est simple : il ne produit ni ne consomme de la matière-énergie ; il se limite à absorber de la matière-énergie pour la rejeter continuellement. C'est ce que la pure physique nous enseigne [...] Du point de vue de la thermodynamique, *la matière-énergie absorbée par le processus économique l'est dans un état de basse entropie et elle en sort dans un état de haute entropie* [Georgescu Roegen, 1979 :41-44 ]

Une signification importante du passif écologique, depuis la critique primitive d'Engels, sera ainsi dans un premier temps de préciser poste à poste ce que fait le processus économique local, en montrant qu'il n'impacte pas sur la masse et l'énergie supposées constantes des compartiments AHL du territoire, mais sur la variabilité des composantes p et V de l'exergie globale de ces compartiments, produits de la variabilité conjointe de  $G_B + TS$ , la néguentropie et l'entropie.

Ceci pouvant être examiné avec un niveau de détail suffisant à nous donner nombre de ratios utiles à l'analyse et la décision politique.

Notre *second temps* fait référence à l'agrégation, de territoire en territoire, jusqu'à l'échelle planétaire, des actifs et passifs écologiques ; et à la partie de notre postulat du

chapitre IV concernant l'existence d'une diversité structurale ( $D_{ES}$ ) des compartiments thermodynamiques AHL, telle à produire une  $D_{ET}$  globale de la Biosphère.

$D_{ES}$  et  $D_{ET}$  qui seraient le produit direct de la *diversité différentielle* de pression et volume spécifiques de ces compartiments, induite par le développement de l'exergie biogéochimique dans l'hydrosphère et la lithosphère, et de leur contrepartie géochimique biogène dans l'atmosphère, et donc de la biodiversité dans l'Ecosphère.

Au regard de cet aspect de notre postulat, la signification essentielle du passif écologique, et plus précisément d'un solde négatif entre actif et passif, serait de montrer que le processus économique, dont les impacts sur la variabilité des composantes p et V de l'exergie des compartiments AHL se cumuleraient de territoire en territoire jusqu'à l'échelle planétaire, influerait directement sur la  $D_{ET}$  globale de la Biosphère ; et donc sur l'entier processus planétaire de maintien et développement du vivant.

### 6.1.3 Conséquences

Il ne s'agit pas dans nos travaux d'une nouvelle métrique au sens propre, mais plutôt d'une extension aux écosystèmes naturels de la métrique développée à l'aube de la révolution industrielle, pour mesurer par exemple, en termes de travail produit, la variation dynamique de pression et de volume de l'air à l'intérieur de l'ensemble cylindre/piston d'un moteur.

Puis, pour ces écosystèmes, de l'approfondissement de cette métrique avec la  $D_{ES}$  et la  $D_{ET}$ , dont nous avons étudié l'intérêt à l'échelle d'un petit écosystème.

C'est afin notamment d'élargir l'étude de leur pertinence à une échelle territoriale, que nous passerons dans les développements du passif écologique, de la mesure classique de consommation totale d'exergie pV, rapportée à une surface, à une exergie pV dont nous distinguerons volume et pression, pour l'état standard et l'état naturel humide (pV.m).

En fonction de quoi nous développerons notre système de calcul en deux parties :

1- Après avoir développé dans le présent chapitre, en deux étapes principales, le processus de calcul du passif écologique, fondé sur la consommation annuelle (flux) d'exergie d'une collectivité territoriale (qui passe au préalable par le calcul du passif national), nous rapporterons cette exergie consommée à l'emprise territoriale (surface) de cette collectivité (dimension horizontale 2D). Ce qui nous donnera l'intensité énergétique en  $J.m^{-2}$  de ses flux de consommation, qui caractérisera une « fertilité économique » traduisant l'intensité de ses besoins d'échange énergétiques ; ainsi que différents paramètres complémentaires qualifiant le degré d'autonomie ou de dépendance de cette collectivité.

2- Puis, dans le cadre du chapitre relatif au Bilan écologique, nous passerons à une dimension en volume (3D) et établirons la comparaison finale des flux de passif et d'actif, en les rapportant aux pressions ( $J.m^{-3}$ ) et volumes des stocks d'exergie constatés (et alloués, nous précisons alors ce concept) des compartiments AHL de ce territoire.

Entre l'année n et le solde des flux actif/passif de l'année n+1, nous pourrions alors établir le nouvel état « net » des stocks de l'année n +1, qui nous donnera la nouvelle  $D_{ET}$  du territoire en  $J.m$  et sa variation, négative ou positive.

## 6.2 Méthodologie de calcul : Antécédents et problématique

### 6.2.1 Antécédents

Quand l'actif écologique répond à une approche de type « Bottom-up », agrégeant les résultats de territoire en territoire pour remonter les barreaux de l'échelle jusqu'au niveau mondial, le passif écologique répond à l'inverse à une approche de type « Top-down », qui part du niveau mondial et des niveaux nationaux pour arriver aux territoires.

Le calcul du passif écologique de n'importe quel sous-territoire passe en effet obligatoirement, pour des raisons de cadrage des nomenclatures, de disponibilité et de cohérence internationale des données, par le calcul du passif national.

En ouverture de nos travaux de recherche doctorale, nous avons terminé une recherche entamée alors que nous travaillions encore à l'Agence Régionale Pour l'Environnement et l'Écodéveloppement (ARPE) de la Région PACA, concernant une application française pilote de la méthodologie REAP (*Ressources & Energy Analysis Program*). Méthodologie développée par Tommy Wiedmann et John Barret (2005) du *Stockholm Environment Institute* (SEI), et assistés dans cette tâche par Mathis Wackernagel (Wiedmann et autres, 2006).

Figure 87 : Publication antérieure concernant le **Passif écologique** de la France



Publication téléchargeable à l'adresse : <http://hal.archives-ouvertes.fr/hal-009116878>

REAP est une méthodologie Top Down qui utilise l'analyse Input/Output (Leontief, 1973) pour désagréger à l'échelle des collectivités territoriales (de la région à la commune), des comptes écologiques nationaux « déjà existant », à l'exemple de l'Ee établie par le GFN, ou du bilan carbone de la France (production + imports - exports), que nous avons pour notre part établi à partir des données d'émissions CO<sub>2</sub> (format CCNUCC) fournies par le *Citepa*.

Notons que REAP ne désagrège que les « passifs » environnementaux (comme le bilan carbone ou l'Ee), établis en unités *physiques*, et non les actifs ; notamment du fait que les passifs sont directement liés aux activités économiques, ce qui permet à cette méthodologie de « cadrer » leur recensement sur les comptes *monétaires* nationaux (Tableau Entrées/Sorties - TES) établis en France par l'Insee.

Ceci quand les comptes de l'Ee (EFA, *Ecological Footprint Account*), sont composés comme nous l'avons déjà précisé, d'un actif, la *biocapacité*, et d'un passif, l'Ee *en soi*.

Nous avons ainsi pu primitivement obtenir le passif écologique (de la population urbaine) de notre territoire de référence.

Sachant que cette méthodologie, une fois mise en œuvre et automatisée (modèle Excel), permet d'obtenir simplement le passif de n'importe quel sous territoire national à partir d'un certain nombre de paramètres le caractérisant.

Ces antécédents étant exposés, précisons maintenant que, quand REAP désagrège des comptes « déjà » existant, cela veut dire qu'il n'existe aucune relation entre cette méthodologie et les comptes qu'elle désagrège, établis en amont ; même si elle a été spécialement mise au point, entre les années 2000 et 2005, pour pouvoir désagréger l'Ee du Royaume Uni et obtenir celle de ses grandes régions.

Ainsi, lorsque nous avons pu obtenir, vers mi 2010, le passif de notre territoire de référence, celui-ci était fondé sur le passif national français établi très en amont par le GFN, bien avant que nous mettions en œuvre début 2011 notre recherche concernant l'actif écologique (biocapacité) d'un espace naturel.

Et nous ne l'avons obtenu qu'après avoir entièrement « démonté » les calculs de biocapacité selon le GFN, et après avoir reformulé notre thèse pour entamer notre recherche approfondie sur le nouvel actif écologique palliant les insuffisances de la biocapacité.

Or à l'issue de cette recherche, nous nous sommes bien retrouvés avec un passif et un actif écologiques de notre territoire, mais établis selon deux approches très différentes. Et même si tous les deux se trouvaient mesurés en unités *biophysiques*, notre tentative de rapprochement montra rapidement son caractère artificiel puis son impossibilité définitive.

Notre bilan de clôture s'avérait dès lors infaisable. Et c'est en reculant d'autant la rédaction de notre thèse que nous avons entrepris de reformuler entièrement le passif selon Wackernagel et le GFN, comme nous l'avions fait pour l'actif, afin de les rendre, autant que faire se pouvait, entièrement compatibles et comparables.

Mais notre nouveau passif aura fait l'objet d'une méthodologie entièrement renouvelée, intégrée et simplifiée, entre l'amont de son calcul et l'aval de sa désagrégation locale.

Avant de la développer, nous exposerons la problématique de son élaboration, puis la développerons en deux phases principales que nos préalables expliqueront :

Phase 1 - Méthodologie d'élaboration du nouveau passif national (France),

Phase 2 - Méthodologie de désagrégation du passif national à l'échelle locale.

## 6.2.2 La problématique d'une méthodologie intégrée

### 6.2.2.1 Vue d'ensemble de la relation Ee/REAP, méthode primitive

Le GFN élabore les comptes nationaux de l'Empreinte écologique essentiellement en unités physiques, les gha (hectares globaux).

Le grand premier grand apport de REAP fut d'intégrer la dimension monétaire en croisant ces comptes physiques avec les comptes nationaux établis par l'Insee (TES).

En leur donnant la structure comptable des comptes nationaux, cela permettait de rapprocher chaque poste de consommation intermédiaire des branches industrielles (Nomenclature Economique de Synthèse - NES), de ses équivalents physiques en gha.

Et son deuxième grand apport fut de transformer les résultats selon la nomenclature NES, en comptes de dépense/consommation des ménages, recensés par l'Insee selon la nomenclature COICOP (Classification of Individual Consumption by Purpose), ceci via une *table de correspondance* NES-COICOP.

Ce qui permet d'affecter tout ou partie des postes de production industrielle nationaux en gha, à la consommation nationale des ménages, et constitue la recette essentielle de désagrégation locale des comptes nationaux.

Les comptes COICOP sont en effet agrégés par l'Insee depuis l'échelle locale (enquêtes périodiques de consommation de ménages) jusqu'à l'échelle nationale, et sont désagrégables en sens inverse, avec une très grande précision d'affectation, au niveau de chaque « unité administrative » française (régions, départements, communes, jusqu'au quartier pour certaines grandes villes).

Chaque unité administrative est recensée par l'Insee par un certain nombre de ménages de chacune des grandes catégories socioprofessionnelles (CSP, entre 8 et 64, dont agriculteurs, artisans, commerçants,...) de dépenses de consommation.

Après avoir affecté à chaque CSP ses consommations en gha, au prorata de ses dépenses (jusqu'à 120 postes COICOP), cela permet d'agréger les consommations en gha de chaque unité administrative française, fonction de son nombre de ménages de chaque CSP et de sa population totale.

On ne saurait faire plus rigoureux, homogène et comparable.

### 6.2.2.2 Vue d'ensemble du problème Ee/REAP : la « nomenclaturomanie »

Revenons maintenant à l'Ee. Le GFN agrège ses propres comptes de passif en six grandes catégories de produits de consommation, toutes rapportés à six grandes catégories de surfaces de production, traduites en gha reflétant leur productivité, en masse ou en J.m<sup>-2</sup>.

Tableau 36 (figure 88) : Les grandes catégories de l'Empreinte écologique

Types de produits	Types de surfaces
Produits agricoles (agriculture)	Terres agricoles
Produits animaux (élevage)	Pâturages permanents
Produits de la mer et de l'aquaculture	Surfaces en eau, intérieures et maritimes
Bois d'œuvre et bois de chauffage	Forêts gérées
Electricité (dont hydro) et énergies fossiles	Infrastructures + forêts (absorption CO <sub>2</sub> )
Services divers anthroposphère	Toutes surfaces construites

L'Ee (en tant que passif) exprimera dès lors une *demande* de surface (en gha), quand la biocapacité (actif) exprimera une disponibilité, ou une *offre* de surfaces.

Avoir une Empreinte écologique nationale ramenée à 6 postes essentiels ouverts à l'analyse, aura été très utile à la communication internationale de l'Ee, mais posera des problèmes considérables aux collectivités qui tenteront de traduire le constat de l'Empreinte en actions correctives sur le terrain. Ceci d'autant qu'il n'existe pas de relation « explicite » et « transparente », pour le public extérieur, entre les données récupérables sur le terrain et leur transformation en gha, que ce soit pour l'offre ou la demande.

Ce qui explique une grande part de la méthodologie REAP, qui deviendra au Royaume Uni, dans la décennie 2000, un outil important mis à la disposition des collectivités pour établir la relation entre l'Ee et la réalité de leurs chiffres disponibles.

Mais ces 6 postes n'en posèrent pas moins de gros problèmes à REAP, qui consiste à les croiser avec le TES, ventilé (en France) en 114 postes tirés de la nomenclature NES, + 4 postes d'ajustement. C'est à dire 118 postes d'un tableau « symétrique » (ressources/emplois, ou produits/activités) reproduisant la même nomenclature en lignes et en colonnes (tableau Input/output selon Leontief), que l'on trouvera représenté dans la figure 91.

Sans entrer dans les détails, le travail d'affectation, qui représente le cœur de la méthodologie, des 6 catégories de surfaces du GFN aux 118\*118 postes du TES, est extrêmement laborieux et ouvert à de nombreuses erreurs, même si la REAP détaille le processus permettant de les éviter.

Et d'autant plus laborieux qu'il est théoriquement nécessaire, pour établir une tendance, de le reproduire chaque année, périodicité régulière d'établissement des comptes du GFN (pour le compte du WWF monde, et son rapport Planète vivante), ceci en même temps que les comptes de l'Insee, notamment des ménages, sont établis par des enquêtes de périodicité irrégulière.

Mais il nous apparaîtra surtout, finalement (après toute notre expérience à ce sujet), que ce travail d'affectation est parfaitement absurde quand nous prenons du recul et regardons dans leur « ensemble » les procédures de calcul de l'Ee et de REAP.

En effet, que ce soit l'Ee ou sa désagrégation, elles ne seraient presque à elles seules qu'un problème de nomenclatures établies par l'usage, et d'incompatibilité entre celles-ci.

- Nomenclatures nationales et internationales de recueil et d'agrégation des données matière et énergie (Prodcom, Fao, OCDE, CCNUCC, ...) concernant les consommations de ressources naturelles, ainsi que les émissions diverses et rejets, des différents secteurs économiques,
- Nomenclatures de recueil et d'agrégation des données monétaires (NACE, NAF, NES, COICOP, ...),
- Nomenclatures naturalistes, géographiques et surfaciques, concernant les territoires, les sols et leurs usages, la biodiversité, ... (ISIC, CLC, EUNIS, ...)
- Et même des nomenclatures cherchant à faire la synthèse, à l'exemple de NAMEA.

C'est ainsi que dans la procédure Ee → REAP, le GFN commence par recenser les consommations *détaillées* de ressources naturelles, ainsi que les émissions diverses et rejets, à partir de chaque poste de consommation économique élémentaire, selon plusieurs nomenclatures à l'exemple de Fao et Prodcom, plus ou moins proche de la NES. Et il les

agrège ensuite par type de produits comme nous l'avons vu au dessus, pour les rapporter aux types de surfaces correspondant. Ceci selon une nomenclature territoriale qui n'en est pas une puisque, comme nous l'avons vu au premier chapitre, le GFN ne prend pas en compte nombre d'espaces naturels, et se trouve obligée de faire des tas de coupes dans une nomenclature des surfaces terrestres comme CLC (dont l'objectif était par définition d'établir un recensement structuré, le plus exhaustif et partageable possible à l'échelle internationale).

Et après quoi REAP reprend ces consommations recensées dans le *détail* puis *agrégées* en 6 surfaces, pour à l'inverse les *désagréger* et les réaffecter à une nomenclature monétaire *détaillée* (NES) des comptes de la nation, puis les réaffecter ensuite à COICOP, etc.

Donc un travail extrêmement laborieux, redondant et absurde, quand il est bien plus logique d'établir une relation directe des postes *physiques* aux postes *monétaires*.

Mais la situation est ainsi parce que ce sont deux organismes différents (le GFN et le SEI) qui ont élaborées (et contrôlent) leurs méthodologies séparativement, dans l'espace et dans le temps, même s'ils sont relativement coordonnés.

### 6.2.2.3 Problème spécifique au calcul du passif écologique

Les travaux originels de Rees (1992) et Wackernagel (1994) sur l'Ee furent toujours cohérents et fondés sur des données solides, mais avec pour objectif privilégié d'obtenir, dans les années immédiates qui suivirent la CNUED de 1992 à Rio, un « concept marketing », un « produit » extrêmement simple à comprendre, très percutant et en conséquence très communicant, et rapidement communiquant, serait-il fondé sur une éthique légitime : la diffusion accélérée des concepts du développement durable.

Il en ressortira de fait des principes de calcul d'empreinte écologique que nous pourrions qualifier de « simplifiés ».

A contrario, les travaux de Wiedmann & Barrett (2005) se sont inspirés, pour développer la méthodologie REAP, des travaux d'une école d'étude de l'empreinte, ou « des » empreintes écologiques, nationales et régionales, utilisant les méthodologies spécifiques de l'analyse Input/Output.

Et qui s'est originellement et parallèlement développée en Nouvelle Zélande et en Australie (Patterson & McDonald, 1996 ; Lenzen, 2001 ; Lenzen & Murray, 2001, 2003 ; McDonald & Patterson, 2003, 2004, 2006 ; McDonald, 2005).

Ces analyses, très approfondies et parfaitement « cadrées » de nos consommations, venaient passablement contredire les analyses et recensements simplifiés de flux de matière de l'Ee selon Wackernagel et le GFN, ainsi que l'organisation structurelle des données relativement aux territoires et à leurs économies.

Et le GFN ne tarda pas à s'en rendre compte, pour finalement conclure une forme de partenariat croisé, tant avec les australiens, qu'avec Wiedmann & Barrett (Lenzen & autres, 2005 ; Wiedmann & autres, 2006).

Duquel sortira notamment la méthodologie REAP, sous la forme d'une couche « superposée » à l'Ee permettant de la répartir en autant de sous composantes régionales et locales.

Mais non pas de retravailler sa pâte en profondeur pour obtenir une composition uniforme et cohérente de bout en bout de la méthode !

Ce qui fut quelque part logique, car les deux méthodologies étaient de composition et de portée très différentes, et le coup parti de comptes du GFN était trop avancé pour tout remettre en question.

Il n'empêche. Ayant eu à collaborer ponctuellement tant avec Wackernagel qu'avec McDonald (2010), un des promoteurs principaux de la méthode « très » approfondie (McDonald, 2005), nous nous sommes trouvés pour notre part confrontés à un choix difficile quant à notre nouvelle méthodologie de calcul du passif.

Devions-nous reprendre la méthode simplifiée du GFN pour ensuite de toutes façons nous confronter de nouveau aux extrêmes difficultés de REAP ?

Devions-nous adopter les méthodes très approfondies et scientifiquement très argumentées de Patterson et McDonald, pour, en plus, nous confronter aux extrêmes difficultés de REAP ?

Ceci quand il leur avait fallu plusieurs années d'un programme très collaboratif pour le seul développement de l'Ee(ou passif) de la Nouvelle Zélande (McDonald & Patterson, 2003-2006) !

Et alors même que nous étions seul face à notre problème, confrontés à la nécessité de finaliser notre thèse déjà très largement entamée ?

C'est ainsi que nous avons fait un choix, à savoir un mix mâtiné de simplicité en même temps que de rigueur :

1 - Reprendre, pour le calcul du seul passif national les bases de données principales utilisées par le GFN pour ses recensements, mais en cadrant ces données d'entrée avec les méthodes et outils I/O de McDonald, qui lui-même nous les enseigna, sous forme simplifiée (McDonald, 2010), et qui depuis l'origine avaient elles-mêmes inspiré REAP.

Les unes nous apportaient la rapidité relative du recensement, les autres le système de cadrage national (notamment les TES, on en reparlera) et d'analyse, permettant de « contraindre et contenir » les erreurs potentielles à l'intérieur d'une grille d'échange économique ayant des limites identifiées ainsi que des contraintes d'égalité et de proportionnalité bien connues des spécialistes en analyse I/O selon Leontief (1974).

2 - Simplifier dans la foulée la méthodologie REAP puisque celle-ci, justement, entamait son processus par l'analyse I/O,

3- Ramener les deux méthodes à deux phases d'une même méthodologie intégrée, homogénéisée et considérablement simplifiée.

Elle devait finalement s'avérer, à la fois bien plus rapide et cohérente dans sa globalité, et bien moins susceptible d'erreurs dans ses détails.

Et peut-être s'avèrera t-elle dans le futur à la fois propice à la communication et à la vulgarisation, en même temps qu'à une analyse suffisamment approfondie pour l'échelon de la décision politique ?

## 6.3 Une nouvelle méthodologie intégrée

### 6.3.1 Généralités : Le TES français et la SUT anglo-saxonne

Le TES *monétaire* français *complet* (formé autour du tableau *symétrique* - ou tableau Input/Output - 118 x 118 postes, nommé ci-dessous *Tableau des entrées intermédiaires*) se présente ainsi :

Tableau 37 (figure 89) : Le TES français (complet)

TABLEAU ENTREES SORTIES		
Unité : Milliards d'euros		
Organisation du TES		
Tableau des ressources en produits	Tableau des entrées intermédiaires	Tableau des emplois finals
	Compte de production par branche	
	Compte d'exploitation par branche	

Source : Insee

Mais les anglo-saxons le présentent différemment pour organiser ce qu'ils nomment une «SUT» (Supply and Use Table). Elle met en exergue les grandes égalités des entrées/sorties du TES pour le présenter de telle manière à avoir une somme totale *verticale* du tableau des entrées intermédiaires, des comptes de production et des ressources en produits, égale à la somme totale *horizontale* du tableau des entrées intermédiaires et des emplois finals.

Ce qui donne :

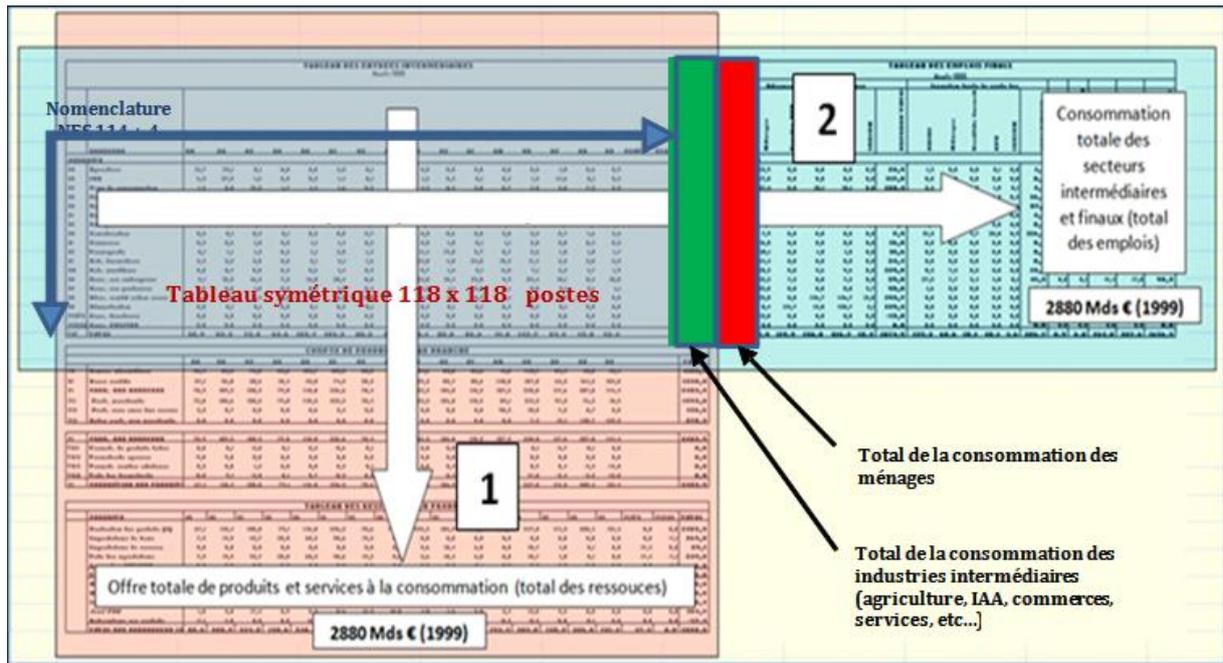
Tableau 38 (figure 90) : Le TES complet réorganisé en SUT et ses égalités

Organisation du TES	
Tableau des entrées intermédiaires	Tableau des emplois finals
Compte de production par branche	
Tableau des ressources en produits	
1	2
	$\Sigma$
	2880 Mds €

Cette égalité des totaux 1 et 2 autorise deux sens de lecture (et de multiples comparaisons) à cette SUT (que nous avons recomposée à partir du TES français) :

- (1) L'offre totale de produits et services (dont imports) soumise à la demande totale
- (2) La demande totale de produits et de services « intermédiaires » consommés par les industries intermédiaires, ainsi que de produits et services « finaux » consommés par les ménages, les administrations centrales et territoriales, ainsi que les variations de stocks et les exportations (produits et services finaux consommés en dehors du territoire).

Tableau 39 (figure 91) : Les deux sens de lecture du TES (complet) réorganisé en SUT



Cette réorganisation sera fondamentale tout au long de nos développements méthodologiques. C'est elle notamment, une fois le TES agrégé (simplifié), qui en phase 1 nous permettra de trouver les équilibres généraux à partir desquels nous pourrons établir *un équivalent physique du modèle monétaire*, fondement de l'établissement de tout passif écologique en mesure biophysique.

### 6.3.2 Phase 1 - Méthodologie de calcul du nouveau passif national

Le grand objectif du passif écologique est d'établir une *stœchiométrie urbaine* faisant le pendant de notre *stœchiométrie territoriale* en flux annuels établie pour l'actif. Afin de pouvoir opposer, sur le même territoire, *les transformations dans un sens aux transformations dans l'autre sens*.

Ce qui suppose pour le passif, en amont du cadre général d'intégration et de comparaison du bilan écologique, une « structure comptable » uniforme, permettant d'agréger toutes les données physiques nécessaires à l'établissement de cette stœchiométrie, en masse et énergie, sur un même cadre territorial que l'actif.

Or, que ce soit :

- Les ressources naturelles extraites, les produits transformés, les déchets, rejets et émissions, recensés en données physiques de masse, énergie, pression ou volume.

Ou :

- Les activités intermédiaires de transformation, puis de consommation finale de ces ressources par les ménages, recensées en données monétaires.

Les unes et les autres font primitivement appel à des lieux en surface, ou des volumes de l'espace terrestre.

Comme il en est d'un SIG (Système d'Information Géographique), ces lieux de l'espace terrestre sont donc susceptibles de croiser toutes les données physiques et monétaires provenant des ressources qui y sont produites et des activités qui les transforment, jusqu'à leur consommation finale.

La question fut ainsi de formuler, *dans une première étape*, une nomenclature « synthétique » d'*agrégation*, en forme de *table de correspondance généralisée*, susceptible de mettre en relation directe (afin de croiser leurs données, physiques et monétaires) :

- Une nomenclature de structuration spatiale,
- Les nomenclatures de structuration des ressources naturelles et des produits primaires consommés par l'économie,
- Une nomenclature de structuration des activités économiques,
- Une nomenclature des sources d'émission de gaz à effet de serre et autres rejets de polluants (déchets organiques et minéraux).

### 6.3.2.1 Nomenclature simplifiée d'agrégation des données : la NAAT 14

Le tableau symétrique, originellement mis au point par Leontief (1973), a pour propriété essentielle de *croiser, sans redondances*, toutes les ressources utilisées par l'économie avec toutes les activités intermédiaires qui les consomment, aux fins d'une production intermédiaire et finale. Ce qui suppose que la nomenclature de croisement, utilisée verticalement pour les ressources/produits, et horizontalement pour les activités, puissent *tous les recenser*.

Nous avons ainsi mis au point une nomenclature d'agrégation et de synthèse des données, la NAAT14 (Nomenclature d'Allocation des Activités aux Territoires), à 14 postes, susceptible de couvrir de manière exhaustive la totalité des produits primaires (toutes ressources naturelles) et activités de transformation des économies modernes :

Tableau 40 (figure 92) : La NAAT 14

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Agriculture	Elevage	Pêche et Aquaculture	Sylviculture et transformation du bois	Mise à disposition de l'énergie	Mise à disposition de l'eau	Mise à disposition des matières minérales	IAA et autres transformations de la biomasse agro-pastorale	Autres industries civiles	Bâtiment et travaux publics	Transports industriels et collectifs	Commerces et services marchands	Services récréatifs, socio-culturels et publics	Assainissement, voirie, gestion des déchets

Les postes de la NAAT 14 intègrent les catégories fondamentales du GFN (tableau 36), et plus largement couvrent l'ensemble des consommations, tant des entreprises et des administrations, que des ménages, tout comme le TES118 !

La NAAT 14 ne comporte pas de redondances, c'est à dire que pour chacune des nomenclatures qu'elle regroupe, nous avons établi une table de correspondance spécifique regroupant des postes strictement identifiables et identifiés. Ainsi par exemple, le poste 11 regroupe les codes suivants de CLC (surfaces) et du TES/NES (euros) :

Tableau 41 (figure 93) : Détail de regroupement de la NAAT 14

Code et libellé NAAT	Libellé CLC	Code CLC	Libellé TES 118 (NES)	Code TES
<b>11</b>  <b>Transports industriels et collectifs</b>	Réseaux routier et ferroviaire et espaces associés	122	Transports ferroviaires	K01
	Zones portuaires	123	Transport routier de voyageurs	K02
	Aéroports	124	Transport routier (ou par conduites) de marchandises	K03
			Transports par eau	K04
			Transports aériens	K05
			Manutention, entreposage, gestion d'infrastructures	K07
			Organisation du transport de fret et transport spatial	K09

Finalement, la NAAT 14 sera susceptible d'agréger :

- La nomenclature Corine Land Cover (CLC 44 postes),
- Les nomenclatures Fao et Prodcum pour les ressources et les produits (plusieurs centaines de postes),

- Le format CCNUCC défini par l'IPCC (International Panel on Climate Change) pour identifier les secteurs de consommation d'énergies fossiles et les sources d'émission de GES (CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, ...), nomenclature à plusieurs centaines de postes,
- La nomenclature NES (TES national, 118 postes).

Ce qui permet de faire converger et d'agrèger dans un même cadre de comparaison tous les types de données d'un même territoire (la France dans une première étape) :

- Les données de consommation matière, converties en exergie.
  - Produits agricoles et d'élevage, y compris lait, beurre, ...
  - Produits de la pêche et de l'aquaculture,
  - Produits forestiers, notamment bois d'œuvre et bois énergie,
  - Energies renouvelables (hydroélectricité, ...) et fossiles,
  - Matières minérales, ...
- Les données monétaires de consommation/production des industries intermédiaires.
- Les données physiques de production de déchets, solides, liquides et gazeux

Le tableau suivant nous donne un exemple d'affectation à la NAAT 14 des consommations d'énergie des activités industrielles de la France avec les émissions CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>O et CH<sub>4</sub> correspondantes (format CCNUCC), puis de leur convergence avec les surfaces CLC nationales elles-mêmes affectées à la NAAT.

Tableau 42 (figure 94) : Détail de regroupement de la NAAT 14

Donnés : France		NAAT 14													
Inventaire national 2000 Source : CITEPA Format : CCNUCC		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Fossils fuels (Tera Joules - TJ)		Agriculture	Elevage	Pêche et Aquaculture	Sylviculture et transformation du bois	Mise à disposition de l'énergie	Mise à disposition de l'eau	Mise à disposition des matières minérales	IAA et autres transformations de la biomasse agro-pastorale	Autres industries civiles	Bâtiment et travaux publics	Transports industriels et collectifs	Commerces et services marchands	Services récréatifs, socio-culturels et publics	Assainissement, voirie, gestion des déchets
1. Energy	5.451.393														
A. Fuel Combustion	5.377.705														
1-Energie industries	760.939					760.939									
2-Manufacturing industries and Bâtiment	1.003.031				80.489				165.531	349.764	407.247				
3-Transports	1.885.183										1.885.183				
4. Other Sectors	1.728.552	102.374	58.719	2.977	3.937	1.560.545									
B. Fugitive Emissions from Fuels	73.688					73.688									
2. Industrial Processes	275.844														
A. Mineral Products	173.540						173.540								
B. Chemical Industry	41.045	24.254	13.911	705	933				1.242						
C. Metal Production	51.940								51.940						
D. Other Production	9.319								9.319						
3.Solvent and Other Product Use	21.904								21.904						
4.Agriculture (Cl other Sectors)	-														
5.Land-Use (non renseigné)	-														
6.Waste	24.330														24.330
Total TJ (sans land use)	5.773.470	126.627	72.631	3.683	85.359	2.395.171	-	173.540	165.531	434.170	407.247	1.885.183	-	-	24.330
<b>Emissions équivalentes en Gg (1000 tonnes)</b>															
Total CO <sub>2</sub> Gg	408.213	7.973	4.573	232	5.461	159.534	-	12.108	11.264	38.689	29.567	137.081	-	-	1.731
Total CH <sub>4</sub> Gg	3.020	23,85	2.045,49	0,16	7,18	213,28	-	-	0,63	1,43	1,75	28,98	2,31	144,88	550,39
Total N <sub>2</sub> O Gg	273	176,40	21,02	0,00	0,69	4,29	-	-	0,41	50,29	1,07	9,88	0,90	3,27	5,22
<b>Surfaces équivalentes en hectares</b>															
Total CLC 2006 France Ha	54.943.504	24.156.948	9.954.251	25.786	15.560.462	60.951	309.359	99.216	307.208	34.134	8.421	102.023	2.138.754	2.178.040	7.951

En procédant de manière équivalente pour toutes les données physiques de consommation de l'économie (ramenées à leur niveau d'exergie) avec leurs contreparties systématiques en déchets et émissions diverses, nous pourrions par strate élaborer le TES14 symétrique et finalement, en détaillant les contreparties chimiques de ces consommations, pour l'oxydation et la réduction, établir la *stœchiométrie urbaine* recherchée pour le passif et le bilan écologiques.

Ce qui supposera quelques étapes précises d'élaboration.

### 6.3.2.2 Agrégation du TES 118 : Le TES 14 symétrique *monétaire*

La NAAT14, disposée à l'horizontal et à la verticale d'un tableau symétrique, nous permettra d'agrèger le TES 118 national (tableau symétrique central 118 x 118 du tableau 39)

établi par l'Insee, en un nouveau TES 14 (14 x 14) *monétaire* format le parfait *modèle réduit* du tableau symétrique national. Ceci grâce à une méthode d'agrégation Input/Output fournie par Garry McDonald, membre associé du laboratoire REEDS, expert néo-zélandais en matière d'analyse I/O appliquée à l'écologie des territoires (McDonald, 2005, 2010 ; McDonald et Patterson, 2006).

### 6.3.2.3 Confection du TES 14 symétrique biophysique

Le TES14 monétaire *symétrique* nous permettra ensuite d'étudier toutes relations propres à affecter à un nouveau tableau symétrique de format identique, en plusieurs étapes, toutes les ressources en matière et énergie consommées nationalement.

Pour la collecte des données physiques, rien de très nouveau, sauf à être long et délicat. Comme nous l'avons déjà dit, nous avons comme le GFN utilisé les BbD internationales disponibles auprès de la Fao, de l'OCDE, de l'Europe, et nationales, comme les services du Citepa (émissions de GES), de l'Insee, les services ministériels (Prodcom), etc.

Le seul problème *radical* étant de repérer les erreurs, et de rendre les données de ces bases « tant soit peu » cohérentes les unes par rapport aux autres, tant en termes de structure statistique, que temporelle et spatiale. Ce qui n'est pas une petite affaire et s'avère très consommateur de temps.

Nous avons pareillement utilisé les BbD disponibles, à l'exemple de « Cliqual 2012 » (consommations alimentaires), pour transformer ces matières, le plus souvent exprimées en masse, parfois en litres ou unités, en niveaux d'exergie. Et pour certaines matières « biogènes », comme l'eau et les minéraux, nous avons utilisé tout particulièrement les données exhaustives de Valero (2008).

Pour l'affectation de ces données à la NAAT14 en vue de la confection du TES14 symétrique physique, la question fut pour nous d'allouer cet ensemble de consommations matière et énergie de la France, rapportées à leur contenu en exergie<sup>186</sup>, aux différentes branches industrielles agrégées de consommation intermédiaire.

Il y avait les postes parfaitement connaissables (postes 1 à 8 et 14 de la NAAT), et les postes très difficilement connaissables par le seul recensement des données (postes 9 à 13).

D'autant que pour certains secteurs productifs vitaux de la nation, il devenait extrêmement complexe de dégager l'équivalent en exergie de leurs consommations structurelles monétaires (coefficients d'activité) des produits de tous les autres secteurs (principe du TES de Leontief) ; citons comme exemple la construction d'un Airbus ou d'un TGV.

Sans entrer dans les détails, nous sommes « censé » être parvenu à équilibrer la table par un « mix » continu de deux grandes boîtes à outils méthodologiques :

- La boîte à outils d'analyse I/O (coefficients techniques d'activité, inversion de matrice, ...) développée par McDonald (2010), déjà utilisée en amont, qui nous aura permis cette fois de transposer vers des données *physiques* les divers *coefficients d'activité* des secteurs industriels et de service de notre nouveau TES 14 *monétaire*.

---

<sup>186</sup> Nous verrons comment le niveau d'exergie, dans un sens ou l'autre de son épuisement ou de son transfert vers d'autres compartiments AHL, est partout significatif de nos consommations et de leurs contreparties en rejets.

Et qui surtout nous aura permis de calculer les importations et les exportations « indirectes » que supposent une transposition en masse et énergie des échanges monétaires. Quand nous achetons une machine à laver fabriquée en Chine, cela suppose en effet que la Chine produise une certaine quantité d'émissions (CO<sub>2</sub>, ...) et de rejets qui sont de notre entière responsabilité, quand nos exportations reporteront leur responsabilité vers les pays importateurs.

- La boîte à outils de modélisation physique développée dans la décennie 1980 par le CNRS (Valette, 1980 ; Deflandre et autres, 1987 ; Matarasso, 1990) ; et notamment le MEPP (Modèle d'Economie Physique et Prospective), dont la logique nous aura permis de calculer les inconnus et d'obtenir les grands ajustements d'équilibre du TES biophysique.

Ce qui demanda forcément quelques simplifications, qui dans le détail révéleraient probablement certaines erreurs, mais qui dans le global d'une telle agrégation, auront fondé une forme d'équilibre général de la table biophysique, vue comme un tout cohérent tout à fait opposable à la table monétaire.

Nous pourrions presque parler d'une question de « pixellisation » de l'image biophysique que nous avons tirée du tableau monétaire globale.

Au bout de quoi nous aurons recomposé un tableau symétrique 14 x 14 « censé » représenter une contrepartie *physique* (une photo reconnaissable) du tableau symétrique *monétaire* des entrées/sorties de l'économie française.

#### 6.3.2.4 Confection du TES 14 *biophysique* complet, ou Passif écologique

A partir duquel nous reconstituerons en suivant la même méthode, un TES agrégé *complet*, tel qu'on le voit dans la figure 91, en répartissant notamment les consommations intermédiaires des entreprises, les consommations finales des ménages des administrations, les imports et exports, etc. Le tout aboutissant sur une SUT *biophysique* nommée généralement *Physical Input/Output Table* (PIOT)<sup>187</sup>, dont un exemple significatif nous est donné par les travaux de McDonald & Patterson (2006).

Cette PIOT 14 x14 sera supposée :

- Agréger l'entière consommation des ressources naturelles nationales,
- Réfléter le TES 14 x 14 monétaire,
- Permettre de recomposer, avec ses contreparties en émissions et déchets divers, une stœchiométrie urbaine complète de l'économie nationale,
- Représenter in fine l'entier **Passif écologique** national.

### 6.3.3 Phase intermédiaire : Passer des entreprises aux ménages

#### 6.3.3.1 De NAAT14 (entreprises) à COICOP13 (ménages)

Le TES de la figure 91 est dit complet, mais pas pour nos besoins de désagrégation locale du passif national.

Observons dans le tableau de cette figure la colonne rose désignée *Total de la consommation des ménages*. Elle représente la consommation des ménages français

---

<sup>187</sup> C'est à partir de cette PIOT que nous recomposerons finalement la *stœchiométrie urbaine* de la collectivité étudiée au niveau du Bilan écologique.

verticalement structurée et détaillée par la nomenclature *industrielle* des consommations intermédiaires à 118 postes du TES (et maintenant par la NAAT 14).

Or nous avons absolument besoin, pour notre désagrégation territoriale, de connaître le détail de cette même consommation des ménages, mais structurée par la nomenclature COICOP, qui permet de caractériser les produits et services, finis et finaux, consommés par les ménages français.

Ce pourquoi l'Insee établit une *table de correspondance*, de 118 x 120 postes, permettant de réallouer entièrement la consommation des ménages structurée par NES à la nomenclature spécifique COICOP.

Cette table, ramenée à des coefficients, est très précieuse aux entreprises françaises (et des autres pays utilisant ces standards), parce qu'elle établit directement le rapport offre/demande national et permet quantité de projections de leurs services de marketing.

Elle est de même très précieuse pour la méthodologie REAP, qui s'en sert pour désagréger l'Ee à l'échelle des collectivités territoriales (unités administratives).

Lors de notre application pilote de REAP, nous l'avions déjà entièrement reconstituée, ce qui nous aura évité beaucoup de peine en amont.

En aval, il nous fallait maintenant agréger cette table, ce qui devrait nous permettre un saut considérable de simplification de cette méthodologie, et de faciliter ainsi considérablement notre tâche.

Et pour ce faire, tout comme nous avons agrégé la nomenclature du TES avec la NAAT14, il nous fallait maintenant agréger COICOP à 120 postes en quelques postes très significatifs.

### 6.3.3.2 Nomenclature simplifiée de désagrégation du passif : COICOP13

Cette nomenclature simplifiée devrait offrir aux collectivités publiques et privées, ainsi qu'à la population, les moyens d'une comparaison explicite de nos consommations quotidiennes en regard du passif écologique ; d'établir le lien direct entre cette consommation, vue comme une *demande*, et une *offre* des entreprises qui déclenchera à la suite une *demande* de ressources naturelles, et autant de rejets environnementaux.

Permettre une relation de cause à effet la plus transparente possible, poste de consommation finale à poste de production intermédiaire, et poste de production intermédiaire à poste de consommation primaire (de ressources naturelles).

En forme de prise de conscience progressive de nos responsabilités !

Faire ainsi que la nouvelle table simplifiée, nationale ou désagrégée à une échelle locale, puisse devenir un outil *polyvalent* de référence des collectivités dans leur analyse comparée des différents postes de consommation, au regard tant de nos différents passifs écologiques, que des actifs écologiques de nos territoires.

Mais nous reviendrons sur l'importance et l'utilité de ce potentiel d'analyse de nos responsabilités de « consomm'acteurs » et de l'action correctrice potentielle.

Nous avons ainsi défini une nouvelle nomenclature agrégée, de 13 postes, nommée « COICOP13 », avec des attributs et fonctions susceptibles de permettre un équilibre optimal entre la synthèse très complexe de milliers de données, et la « lecture » simplifiée de nos responsabilités comparées.

Tableau 43 (figure 95) : La nomenclature agrégée COICOP13

01	02	03	04	05	06	07	08	10	11	09	12	13
Fruits, légumes, huiles, lait, graisses, fromages et œufs	Viandes, poissons et crustacés	Céréales, pain, pâtisseries, sucre, miel, confitures, chocolat & confiserie	Boissons chaudes, boissons non alcoolisées et autres produits alimentaires	Boissons alcoolisées et tabac	Articles d'habillement et chaussures	Eau, gaz, électricité, énergie bois et autres services aux logements	Meubles, articles de ménage et entretien de l'habitation	Santé	Transport	Education, communications et systèmes d'information	Hôtel, restaurant, loisirs, culture, tourisme int-ex	Autres biens et services (dont assurances)

A partir de quoi nous avons pu agréger la table de correspondance nationale, toujours au moyen des outils de McDonald, pour obtenir la table de croisement suivante, donnée ici pour les seuls ménages, quand nous avons l'équivalent pour les administrations publiques, etc.

### 6.3.3.3 Table de correspondance NES 14 → COICOP 13

Tableau 44 (figure 96) : Table de correspondance NAAT14 → COICOP13

ME - France 1999		01	02	03	04	05	06	07	08	10	11	09	12	13	Consommation des ménages
NAAT14		Fruits, légumes, huiles, lait, graisses, fromages et œufs	Viandes, poissons et crustacés	Céréales, pain, pâtisseries, sucre, miel, confitures, chocolat & confiserie	Boissons chaudes, boissons non alcoolisées et autres produits alimentaires	Boissons alcoolisées et tabac	Articles d'habillement et chaussures	Eau, gaz, électricité, énergie bois et autres services aux logements	Meubles, articles de ménage et entretien de l'habitation	Santé	Transport	Education, communications et systèmes d'information	Hôtel, restaurant, loisirs, culture, tourisme int-ex	Autres biens et services (dont assurances)	
1	Agriculture	6.744	-	131	-	-	-	149	-	-	593	-	4.079	-	11.697
2	Élevage	1.233	6.774	-	-	-	-	-	-	-	-	-	192	-	8.200
3	Pêche, Aquaculture	-	3.295	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3.295
4	Sylviculture et transformation du bois	-	-	-	-	-	-	1.546	14.383	-	-	-	12.556	-	28.484
5	Mise à disposition de l'énergie	-	-	-	-	-	-	26.103	-	-	25.875	-	-	-	51.978
6	Mise à disposition de l'eau	-	-	-	-	-	-	2.997	-	-	-	-	-	-	2.997
7	Mise à disposition des matières minérales	-	-	-	114	-	-	-	59	-	-	-	-	-	173
8	IAA et autres transformations de la biomasse agro-pastorale	21.018	34.659	22.586	11.352	26.010	34.895	-	2.832	154	-	-	1.962	-	155.468
9	Autres industries civiles	-	-	54	-	-	4.592	1.677	22.406	10.999	52.184	6.080	15.958	17.284	131.234
10	Bâtiment et travaux publics	-	-	-	-	-	-	7.905	-	-	-	-	-	-	7.905
11	Transports industriels et collectifs	-	-	-	-	-	-	-	-	-	18.432	40	744	-	19.216
12	Commerces et services marchands	-	-	-	-	-	272	130.047	1.727	-	15.289	585	4.959	41.531	194.411
13	Services récréatifs, socio-culturels et publics	-	-	-	-	-	1.039	1.057	4.786	13.313	1.216	19.343	56.590	22.450	119.793
14	Assainissement, voirie, gestion des déchets	-	-	-	-	-	-	5.009	-	-	-	-	-	-	5.009
<b>Production intermédiaire</b>		<b>28.996</b>	<b>44.729</b>	<b>22.771</b>	<b>11.466</b>	<b>26.010</b>	<b>40.798</b>	<b>176.489</b>	<b>46.192</b>	<b>24.466</b>	<b>113.590</b>	<b>26.048</b>	<b>97.041</b>	<b>81.265</b>	<b>739.860</b>

Notons que cette table, pour ses aspects monétaires et physiques, représente un « zoom » de la colonne de consommation des ménages telle que nous la découvrons dans le TES complet de la figure 91.

Elle peut donc s'accrocher, comme une annexe, directement à celui-ci, et former, sur les plans monétaires et physiques, un prolongement de la consommation intermédiaire des entreprises vers la consommation finale des ménages, comme on le verra dans le tableau de présentation du cadre synthétique de calcul du passif écologique.

Cette table, nationale et en millions d'€ dans le tableau du dessus, nous permettra :

- D'une part la désagrégation du passif écologique national,
- D'autre part, quand nous aurons obtenu l'équivalent pour chaque collectivité territoriale, l'analyse synthétique en 13 postes (sommés), et l'analyse approfondie selon  $13 \times 14 = 182$  possibilités, au regard de l'équivalent physique de cette table, de nos responsabilités *partagées* entre entreprises et consommateurs.

### 6.3.4 Phase 2 - Méthodologie de désagrégation du passif national

Une fois cette table réalisée, les choses deviennent plus faciles, même si elles restent longues à mettre en œuvre.

La première étape sera d'affecter les sommes des colonnes de COICOP13 (en bleu dans le tableau 44), pour les tables monétaires et physiques, aux grandes catégories

socioprofessionnelles (CSP) répertoriées par l'Insee, au prorata de leurs consommations spécifiques telles que nous les donnent les enquêtes sur les dépenses de consommation des ménages. L'Insee donne 8 à 64 CSP, mais nous n'en avons retenues à ce stade que 8.

Tableau 45 (figure 97) : Affectation des dépenses agrégées COICOP13 aux CSP

M€ CSP	Fruits, légumes, huiles, lait, graisses, fromages et œufs	Viandes, poissons et crustacés	Céréales, pain, pâtisseries, sucre, miel, confitures, chocolat & confiserie	Boissons chaudes, boissons non alcoolisées et autres produits alimentaires	Boissons alcoolisées et tabac	Articles d'habillement et chaussures	Eau, gaz, électricité, énergie bois et autres services aux logements	Meubles, articles de ménage et entretien de l'habitation	Santé	Transport	Education, communications et systèmes d'information	Hôtel, restaurant, loisirs, culture, tourisme int-ex	Autres biens et services (dont assurances)	Totaux
	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	
<b>Agriculteurs</b>	525	830	494	200	400	685	3.111	787	574	1.908	435	1.238	1.500	12.686
<b>Artisans, commerçants</b>	1.837	2.836	1.478	755	1.615	3.415	9.641	3.286	1.235	6.641	1.835	6.554	5.523	46.651
<b>Cadres, professions</b>	3.444	4.968	2.725	1.529	3.057	7.755	31.318	7.626	3.558	18.431	5.142	20.173	14.690	124.417
<b>Professions intermédiaires</b>	4.519	6.487	3.635	1.894	4.066	8.103	33.586	7.712	3.669	23.605	5.142	19.725	15.047	137.192
<b>Employés</b>	2.840	4.194	2.534	1.214	2.926	4.494	17.659	3.969	2.112	12.743	2.943	10.262	8.738	76.629
<b>Ouvriers</b>	5.665	8.981	4.988	2.407	6.892	8.047	33.520	7.644	4.007	26.312	4.556	17.063	15.106	145.190
<b>Retraités</b>	8.427	14.001	5.557	2.835	5.428	6.348	31.503	12.730	8.124	19.288	4.119	17.927	17.248	153.537
<b>Autres inactifs</b>	1.739	2.431	1.359	631	1.625	1.950	16.151	2.439	1.186	4.663	1.875	4.098	3.412	43.558
<b>Totaux</b>	<b>28.996</b>	<b>44.729</b>	<b>22.771</b>	<b>11.466</b>	<b>26.010</b>	<b>40.798</b>	<b>176.489</b>	<b>46.192</b>	<b>24.466</b>	<b>113.590</b>	<b>26.048</b>	<b>97.041</b>	<b>81.265</b>	<b>739.860</b>

Partant de là, comme nous connaissons exactement, à l'échelle nationale, le nombre de ménages de chaque CSP (fonction de la périodicité des enquêtes de l'Insee), il deviendra aisé de connaître la consommation *monétaire* moyenne d'un ménage de chacune des catégories, ainsi que les consommations *physiques* correspondantes.

Et comme nous connaissons de la même manière, pour chaque collectivité territoriale française, le nombre de ménages de chaque CSP de sa population, il deviendra tout aussi aisé de calculer la consommation *monétaire* de chaque collectivité, ainsi que les consommations *physiques* correspondantes.

Sur ces bases, nous recomposons, par un processus à rebours, les TES14 monétaires et physique, complets, des collectivités, obtenant ainsi la consommation/production des entreprises nécessaire à alimenter leur population, son administration publique, la part des imports et exports, etc..

### 6.3.5 Cadre synthétique de calcul du Passif écologique

Qu'il soit national ou désagrégé localement, le cadre synthétique de calcul du passif écologique comprendra deux versions.

La première, dite *Passif écologique A* sera le reflet *physique* « supposé » du TES *monétaire* (réorganisé en SUT et agrégé), et intégrera les parties NES (entreprises + imports directs) et COICOP (ménages et administrations + exports directs).

La seconde, dite *Passif écologique B*, sera un peu simplifiée dans sa lecture et comprendra en sus les imports et exports « indirects », dus à la consommation de masse et d'énergie relatifs à la production des biens et des services que nous importons, et qui suppose autant de contreparties en émissions CO<sub>2</sub>, ...

Le Passif écologique de type B se présentera ainsi, quelle que soit la collectivité :

Tableau 46 (figure 98) : Cadre synthétique de calcul du **Passif écologique**

Terajoules - France 1999														COICOP13													Exportations		Imports directs		Imports indirects		Passif écologique																																																																																
														Nomenclature horizontale : COICOP13													ISBLM + APU		FBCEt		Exports		Imports		Passif																																																																														
														Nomenclature verticale : NAAT14													ISBLM + APU		FBCEt		Exports		Imports		Passif																																																																														
														Nomenclature horizontale et verticale : NAAT 14													ISBLM + APU		FBCEt		Exports		Imports		Passif																																																																														
														Nomenclature horizontale et verticale : NAAT 14													ISBLM + APU		FBCEt		Exports		Imports		Passif																																																																														
Production														01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100
Imports directs																																																																																																																	
Production																																																																																																																	
Imports indirects																																																																																																																	
Production																																																																																																																	
Imports indirects																																																																																																																	
Production																																																																																																																	
Imports indirects																																																																																																																	
Production																																																																																																																	
Imports indirects																																																																																																																	
Production																																																																																																																	
Imports indirects																																																																																																																	
Production																																																																																																																	
Imports indirects																																																																																																																	
Production																																																																																																																	
Imports indirects																																																																																																																	
Production																																																																																																																	
Imports indirects																																																																																																																	
Production																																																																																																																	
Imports indirects																																																																																																																	
Production																																																																																																																	
Imports indirects																																																																																																																	
Production																																																																																																																	
Imports indirects																																																																																																																	
Production																																																																																																																	
Imports indirects																																																																																																																	
Production																																																																																																																	
Imports indirects																																																																																																																	
Production																																																																																																																	
Imports indirects																																																																																																																	
Production																																																																																																																	
Imports indirects																																																																																																																	
Production																																																																																																																	
Imports indirects																																																																																																																	
Production																																																																																																																	
Imports indirects																																																																																																																	
Production																																																																																																																	
Imports indirects																																																																																																																	
Production																																																																																																																	
Imports indirects																																																																																																																	
Production																																																																																																																	
Imports indirects																																																																																																																	
Production																																																																																																																	
Imports indirects																																																																																																																	
Production																																																																																																																	
Imports indirects																																																																																																																	
Production																																																																																																																	
Imports indirects																																																																																																																	
Production																																																																																																																	
Imports indirects																																																																																																																	
Production																																																																																																																	
Imports indirects																																																																																																																	
Production																																																																																																																	
Imports indirects																																																																																																																	
Production																																																																																																																	
Imports indirects																																																																																																																	
Production																																																																																																																	
Imports indirects																																																																																																																	
Production																																																																																																																	
Imports indirects																																																																																																																	
Production																																																																																																																	
Imports indirects																																																																																																																	
Production																																																																																																																	
Imports indirects																																																																																																																	
Production																																																																																																																	
Imports indirects																																																																																																																	
Production																																																																																																																	
Imports indirects																																																																																																																	
Production																																																																																																																	
Imports indirects																																																																																																																	
Production																																																																																																																	
Imports indirects																																																																																																																	
Production																																																																																																																	
Imports indirects																																																																																																																	
Production																																																																																																																	
Imports indirects																																																																																																																	
Production																																																																																																																	
Imports indirects																																																																																																																	
Production																																																																																																																	
Imports indirects																																																																																																																	
Production																																																																																																																	
Imports indirects																																																																																																																	
Production																																																																																																																	
Imports indirects																																																																																																																	
Production																																																																																																																	
Imports indirects																																																																																																																	
Production																																																																																																																	
Imports indirects																																																																																																																	
Production																																																																																																																	
Imports indirects																																																																																																																	
Production																																																																																																																	
Imports indirects																																																																																																																	
Production																																																																																																																	
Imports indirects																																																																																																																	
Production																																																																																																																	
Imports indirects																																																																																																																	
Production																																																																																																																	
Imports indirects																																																																																																																	
Production																																																																																																																	
Imports indirects																																																																																																																	
Production																																																																																																																	
Imports indirects																																																																																																																	
Production																																																																																																																	
Imports indirects																																																																																																																	
Production																																																																																																																	
Imports indirects																																																																																																																	
Production																																																																																																																	
Imports indirects																																																																																																																	
Production																																																																																																																	
Imports indirects																																																																																																																	
Production																																																																																																																	
Imports indirects																																																																																																																	
Production																																																																																																																	
Imports indirects																																																																																																																	
Production																																																																																																																	
Imports indirects																																																																																																																	
Production																																																																																																																	
Imports indirects																																																																																																																	
Production																																																																																																																	
Imports indirects																																																																																																																	
Production																																																																																																																	
Imports indirects																																																																																																																	
Production																																																																																																																	
Imports indirects																																																																																																																	
Production																																																																																																																	
Imports indirects																																																																																																																	
Production																																																																																																																	
Imports indirects																																																																																																																	
Production																																																																																																																	
Imports indirects																																																																																																																	
Production																																																																																																																	
Imports indirects																																																																																																																	
Production																																																																																																																	
Imports indirects																																																																																																																	
Production																																																																																																																	
Imports indirects																													</																																																																																				

Quelles que soient la collectivité et son échelle administrative, le passif écologique comprendra ainsi une fois pour toutes :

Dans sa version « déployée » de tableau entrées/sorties :

- (a) Pour les industries intermédiaires : 14 postes (horizontaux) de base reflétant parfaitement la structure NES du TES national, subdivisés dans un TES symétrique 14 x 14 représentant le tableau des entrées (consommations)/sorties (productions) *physiques* du système économique et industriel français.

Ce qui permettra l'analyse synthétique des responsabilités concernant les consommations intermédiaires spécifiques des entreprises en 14 postes de synthèse (sommés), et leur analyse approfondie selon  $14 \times 14 = 196$  possibilités.

- (b) Pour la consommation finale des ménages : 13 postes (horizontaux) complémentaires, reflétant parfaitement la structure COICOP des enquêtes de consommation de l'Insee, subdivisés par les 14 postes (verticaux) du système de production.

Ce qui permettra l'analyse des responsabilités *partagées* entre entreprises et consommateurs, en 13 postes de synthèses (sommés), et leur analyse approfondie selon  $13 \times 14 = 182$  possibilités.

- (c) Ceci complété de 3 postes horizontaux correspondant respectivement, aux ISBLM (Institutions sans but lucratif au service des ménages) plus les APU (Administrations publiques centrales et au service des ménages), à la FBC (formation brute de capital fixe), et aux exportations.

Dans sa version « synthétique », les 14 postes NAAT de la colonne de sommation de droite, dite « Demande finale », moins les exportations.

Nous disposerons donc au total de 14 postes de synthèse (contre 6 pour l'Ee), et de 30 fenêtres d'analyse détaillée subdivisées par autant de postes NAAT (contre  $(118 + 120) \times 118$  pour REAP !), dont les acteurs pourront s'approprier la zone de regroupement qui leur revient, qui elle même devrait être subdivisible.

Avec autant de possibilités d'action correctrice, ceci pour chacune des communes françaises et des unités administratives de niveau supérieur (EPCI, cantons, départements, ...).

### 6.4 Résultats phase 1 : Le Passif écologique de la France

#### 6.4.1 TES 14 monétaire complet de la France, et son annexe

Le passif écologique (tableau 46), vu comme la contrepartie *biophysique* du TES *monétaire*, supposait d'entrée que nous agrégions ce dernier (méthodologie McDonald, 2010), une fois réorganisé en SUT (Supply & Use Table), selon notre nomenclature simplifiée, la NAAT14.

Tableau 47 (figure 99) : TES monétaire (M€) complet de la France, agrégé à 14 postes NAAT (1999)

M€ - France 1999		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	Consom-mations intermé-diaires	Consom-mation des ménages	ISBLM * + APU **	FBC ***	Exports (directs & indirects)	Demande finale (DF)	
NAAT14		Agriculture	Elevage	Pêche, Aquaculture	Sylviculture et transformation du bois	Mise à disposition de l'énergie	Mise à disposition de l'eau	Mise à disposition des matières minérales	IAA et autres transformations de la biomasse agro-pastorale	Autres industries civiles	Bâtiment et travaux publics	Transports industriels et collectifs	Commerces et services marchands	Services récréatifs, socio-culturels et publics	Assainis-sement, voirie, gestion des déchets							
	1	Agriculture	5.968	2.150	-	60	127	-	-	14.254	214	948	-	-	1.846	-	25.567	11.697	-	524	5.480	43.268
	2	Elevage	2.150	774	-	22	-	-	-	14.283	29	-	-	665	-	17.923	8.200	-	367	3.841	30.331	
	3	Pêche, Aquaculture	-	-	6	-	-	-	-	932	35	-	10	1	452	-	1.436	3.295	-	-	434	5.165
	4	Sylviculture et transformation du bois	587	211	8	25.920	126	49	92	2.824	7.407	3.729	395	14.369	7.997	64	63.778	28.484	5	5.580	12.187	110.034
	5	Mise à disposition de l'énergie	1.893	682	288	1.530	28.865	279	277	2.620	12.016	2.752	9.022	11.984	9.103	187	81.498	51.978	6	1.089	7.735	140.128
	6	Mise à disposition de l'eau	276	99	9	65	108	801	3	267	409	79	41	370	1.130	15	3.672	2.997	-	-	-	6.669
	7	Mise à disposition des matières minérales	103	37	5	174	8	29	215	104	4.312	1.704	-	43	4	9	6.747	173	-	12	530	7.438
	8	IAA et autres transformations de la biomasse agro-pastorale	113	6.322	34	1.267	93	23	26	39.160	5.111	651	393	3.324	21.257	16	77.790	155.468	1	1.239	40.370	274.868
	9	Autres industries civiles	6.785	3.198	55	6.303	3.819	840	1.321	8.751	223.937	33.344	5.033	24.519	24.665	222	342.792	131.234	17.190	86.133	214.855	792.204
	10	Bâtiment et travaux publics	193	69	7	92	2.147	514	39	223	901	15.450	564	6.084	6.841	26	33.150	7.905	33	115.630	-	156.718
	11	Transports industriels et collectifs	28	10	10	1.054	950	180	64	1.301	3.531	839	18.017	14.801	4.794	106	45.685	19.216	1.488	100	14.540	81.029
	12	Commerces et services marchands	3.085	1.111	114	9.009	7.440	1.808	293	16.069	59.160	17.863	16.239	212.301	51.042	884	396.418	194.411	9.576	54.067	25.355	679.827
	13	Services récréatifs, socio-culturels et publics	101	265	6	1.512	1.133	156	59	1.571	6.032	1.427	2.617	32.633	28.731	210	76.453	119.793	306.705	1.915	32.291	537.157
14	Assainissement, voirie, gestion des déchets	34	12	-	285	244	456	17	334	1.259	365	204	2.948	2.537	2.267	10.962	5.009	-	-	-	15.971	
<b>Production intermédiaire</b>		21.314	14.942	542	47.293	45.060	5.135	2.406	102.693	324.353	79.151	52.535	323.377	161.064	4.006	1.183.871	739.860	335.004	264.454	357.618	2.880.807	
Va production + transferts de branche		13.605	9.537	1.355	26.098	24.295	1.102	1.818	44.377	132.969	62.196	49.377	502.820	340.503	9.931	1.219.983						
Importations de biens		3.809	2.671	1.018	16.008	19.178	-	1.416	38.481	194.382	-	-	-	-	-	276.963						
Importations de services		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	15.382	23.484	20.257	-	59.123						
Impôts et marge commerciale		4.539	3.182	2.250	20.635	51.595	432	1.798	89.317	140.500	15.371	36.265	169.854	15.333	2.034	140.867						
<b>Production finale</b>		43.268	30.331	5.165	110.034	140.128	6.669	7.438	274.868	792.204	156.718	81.029	679.827	537.157	15.971	2.880.807						

\* ISBLM = Institutions sans but lucratif au service des ménages  
 \*\* APU = Administration publique et administrations au service des ménages  
 \*\*\* FBC : Formation brute de capital fixe

Ce tableau est une image parfaite du TES118 national. L'année retenue était ici 1999, du seul fait que nous avons développés nos travaux d'application pilote de la méthodologie REAP (Loiret, 2011b, 2012b) en nous fondant sur cette année de référence, et que nous disposions de résultats détaillés (dont la table de correspondance NAAT → COICOP) directement utilisables dans la mise en œuvre de notre nouvelle méthodologie simplifiée.

Cette présentation agrégée du TES monétaire, ainsi que notre procédure REAP simplifiée de désagrégation intégrée dès les débuts de son calcul, nous aura ainsi autorisés à introduire la table de correspondance NAAT14 → COICOP13, comme une simple annexe du TES14. Elle devient ainsi un simple éclatement de la colonne de consommation des ménages selon la nomenclature COICOP en 13 postes, éclatement qui s'avèrera essentiel pour la désagrégation locale de nos résultats.

Tableau 48 (figure 100) : Annexe du TES14 *monétaire* : La consommation des ménages éclatée selon COICOP13

NAAT14	M€ - France 1999														Consom- mation des ménages	ISBLM * + APU **	FBC ***	Exports (directs & indirects)	Demande finale (DF)	
	01	02	03	04	05	06	07	08	10	11	09	12	13							
	Consom- mations intermé- diaires	Fruits, légumes, huiles, lait, grasses, fromages et œufs	Viandes, poissons et crustacés	Céréales, pain, pâtisseries, sucre, miel, confitures, chocolat & confiserie	Boissons chaudes, boissons non alcoolisées et autres produits alimentaires	Boissons alcoolisées et tabac	Articles d'habillement et chaussures	Eau, gaz, électricité, énergie bois et autres services aux logements	Meubles, articles de ménage et entretien de l'habitation	Santé	Transport	Education, communications et systèmes d'information	Hôtel, restaurant, loisirs, culture, tourisme int-ex	Autres biens et services (dont assurances)						
1	Agriculture	25.567	6.744	-	131	-	-	149	-	-	593	-	4.079	-	11.697	-	524	5.480	43.268	
2	Élevage	17.923	1.233	6.774	-	-	-	-	-	-	-	-	192	-	8.200	-	367	3.841	30.331	
3	Pêche, Aquaculture	1.436	-	3.295	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3.295	-	-	434	5.165	
4	Sylviculture et transformation du bois	63.778	-	-	-	-	-	1.546	14.383	-	-	-	12.556	-	28.484	5	5.580	12.187	110.034	
5	Mise à disposition de l'énergie	81.498	-	-	-	-	-	26.103	-	-	25.875	-	-	-	51.978	6	1.089	7.735	140.128	
6	Mise à disposition de l'eau	3.672	-	-	-	-	-	2.997	-	-	-	-	-	-	2.997	-	-	-	6.669	
7	Mise à disposition des matières minérales	6.747	-	-	-	114	-	-	59	-	-	-	-	-	173	-	12	530	7.438	
8	IAA et autres transformations de la biomasse agro-pastorale	77.790	21.018	34.659	22.586	11.352	26.010	34.895	-	2.832	154	-	1.962	-	155.468	1	1.239	40.370	274.868	
9	Autres industries civiles	342.792	-	-	54	-	-	4.592	1.677	22.406	10.999	52.184	6.080	15.958	131.234	17.190	86.133	214.855	792.204	
10	Bâtiment et travaux publics	33.150	-	-	-	-	-	7.905	-	-	-	-	-	-	7.905	33	115.630	-	156.718	
11	Transports industriels et collectifs	45.685	-	-	-	-	-	-	-	-	18.432	40	744	-	19.216	1.488	100	14.540	81.029	
12	Commerces et services marchands	396.418	-	-	-	-	-	272	130.047	1.727	-	15.289	585	4.959	194.411	9.576	54.067	25.355	679.827	
13	Services récréatifs, socio-culturels et publics	76.453	-	-	-	-	-	1.039	1.057	4.786	13.313	1.216	19.343	56.590	119.793	306.705	1.915	32.291	537.157	
14	Assainissement, voirie, gestion des déchets	10.962	-	-	-	-	-	5.009	-	-	-	-	-	-	5.009	-	-	-	15.971	
	<b>Production intermédiaire</b>	<b>1.183.871</b>	<b>28.996</b>	<b>44.729</b>	<b>22.771</b>	<b>11.466</b>	<b>26.010</b>	<b>40.798</b>	<b>176.489</b>	<b>46.192</b>	<b>24.466</b>	<b>113.590</b>	<b>26.048</b>	<b>97.041</b>	<b>81.265</b>	<b>739.860</b>	<b>335.004</b>	<b>264.454</b>	<b>357.618</b>	<b>2.880.807</b>

Ainsi, dès l'entrée de notre procédure de calcul, le tableau principal étant complété de son annexe, tous les concepts comptables *monétaires* résumant le processus économique de consommation primaire → production intermédiaire → consommation finale, sont « posés sur la table » de manière transparente; ce qui nous donne une vision explicite de la totalité des composantes à venir du passif écologique, vu comme un reflet physique le plus exact possible du processus économique dans la globalité de sa présentation comptable (tableau 46).

### 6.4.2 Données de référence du TES *biophysique* (ou Passif *écologique*)

La question suivante concernait les données en exergie qui nous permettraient de transformer le TES *monétaire* en TES *biophysique*. Ici, pour les produits bruts et les transformations de base, nous avons suivi l'exemple général de recensement des données de l'Empreinte écologique. Mais sauf à pousser l'analyse très en détail, à l'exemple des productions brutes de l'agriculture, de l'élevage et de la sylviculture, des productions commercialisées des industries agricoles et alimentaires, et des déchets produits. Quand aux produits complexes aux multiples composantes I/O des postes 9 à 13 de la NAAT, ils ont fait l'objet d'un traitement spécifique en analyse I/O et modélisation physique.

Plus ce recensement serait exact et exhaustif, plus le TES biophysique aurait des chances de refléter le TES monétaire, et donc les impacts réels de l'économie sur l'Ecosphère et la Biosphère.

Tableau 49 (figure 101) : Données de référence du TES14 *biophysique*

NAATI 4	Nature des activités	Nature des produits	Sources	Unités	Transformation en niveaux d'exergie	France 1999 (TeraJoules)
1	Agriculture	Tous produits bruts agricoles	Faostat	Masse	Calculs spécifiques et coefficients d'exergie en joules rapportés aux différentes unités (Source principale : Szargut et autres, 2005 ; Valero Delgado, 2008)	1.037.110
2	Elevage	Tous produits bruts de l'élevage (dont lait, œufs, ...)	Faostat	Masse		187.288
3	Pêche, Aquaculture	Tous produits bruts de la pêche et de l'aquaculture	Faostat	Masse		22.088
4	Sylviculture et transformation du bois	Bois d'œuvre et bois énergie, produits transformés du bois	Faostat	Volume et masse		423.214
5	Mise à disposition de l'énergie	Toutes énergies fossiles brutes et transformées	Citepa (format CCNUCC), OCDE	Energie		5.773.470
6	Mise à disposition de l'eau	Toutes eaux brutes de production (irrigation, eau de refroidissement des centrales, ...) et de consommation	OCDE	Volume		1.383.530
7	Mise à disposition des matières minérales	Toutes matières minérales	Prodcom, WRI (World resources Institute), MFA (programme Natres UE)	Masse		80.332
8	IAA et autres transformations de la biomasse agro-pastorale	Tous produits transformés de l'agriculture, de l'élevage et de la pêche (dont tissus, cuirs, ...)	Prodcom	Masse, volume et unités		1.457.650
9	Autres industries civiles	<i>Résultats spécifiques de l'analyse Input/Output et de la modélisation en économie physique (dont calcul des imports directs et indirects)</i>				
10	Bâtiment et travaux publics					
11	Transports industriels et collectifs					
12	Commerces et services marchands					
13	Services récréatifs, socio-culturels et publics					
14	Assainissement, voirie, gestion des déchets	Tous déchets liquides, organiques et solides <b>Dont :</b> Ordures industrielles et des ménages Eaux polluées et boues de station d'épuration Erosion des matières minérales	OCDE	Volume et masse	Coefficients d'exergie en joules et calculs spécifiques aux niveaux de pollution chimique et organique de l'eau	5.398.022 <i>1.030.980</i> <i>3.488.113</i> <i>878.930</i>

### 6.4.3 Passif écologique de la France, reflet *biophysique* du TES *monétaire*

Cette présentation du passif écologique identique au TES monétaire « cadre » au mieux que faire se peut toutes les erreurs potentielles de calcul de transposition entre unités monétaires et unités biophysiques, et rend l'image globale du TES biophysique opposable poste à poste au TES monétaire.

Cette homothétie « supposée » des deux tableaux, aux échelles nationales et territoriales (comme nous le verrons plus loin), devient le fondement de tous les calculs ultérieurs d'impact de l'économie sur l'Ecosphère et la Biosphère.

Tableau 50 (figure 102) : TES14 *biophysique* complet de la France, ou *Passif écologique*

NAATI4	NAATI4														Consom-mations intermédiaires	Consom-mation des ménages	ISBLM + APU	FBC	Exports (directs & indirects)	Demande finale (DF)	Dont déchets de la demande finale	Passif écologique (exergie) = DF - Exports	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14									
TeraJoules - France 1999																							
	Agriculture	Elevage	Pêche, Aquaculture	Sylviculture et transformation du bois	Mise à disposition de l'énergie	Mise à disposition de l'eau	Mise à disposition des matières minérales	IAA et autres transformations de la biomasse agro-pastorale	Autres industries civiles	Bâtiment et travaux publics	Transports industriels et collectifs	Commerces et services marchands	Services récréatifs, socio-culturels et publics	Assainissement, voirie, gestion des déchets									
1	Agriculture	207.238	54.107	-	1.478	3.455	-	-	383.357	5.463	26.143	-	-	45.685	-	726.926	332.574	-	14.893	155.798	1.230.191	193.081	1.074.393
2	Elevage	36.395	5.710	-	146	-	-	-	129.977	224	-	-	-	4.623	-	177.075	81.013	-	3.628	37.952	299.667	112.379	261.716
3	Pêche, Aquaculture	-	-	259	-	-	-	-	6.712	204	-	48	5	2.285	-	9.513	21.829	-	-	2.875	34.218	12.130	31.343
4	Sylviculture et transformation du bois	8.566	1.066	342	113.904	892	273	15.818	19.123	40.049	27.795	1.743	63.607	36.979	553	330.709	147.699	26	28.934	63.193	570.561	147.347	507.368
5	Mise à disposition de l'énergie	98.357	28.913	23.081	63.877	1.282.579	11.977	57.972	115.612	513.829	123.314	376.835	500.714	382.137	8.602	3.587.801	2.288.237	264	47.941	340.519	6.168.880	395.409	5.828.360
6	Mise à disposition de l'eau	60.159	20.721	2.218	13.520	22.754	167.558	1.127	56.172	85.488	16.674	8.529	76.974	235.305	3.184	770.383	628.769	-	-	-	1.399.152	15.622	1.399.152
7	Mise à disposition des matières minérales	2.219	445	249	1.975	112	363	38.460	1.427	53.300	24.551	-	489	46	140	123.777	3.174	-	220	9.723	136.454	56.121	126.731
8	IAA et autres transformations de la biomasse agro-pastorale	1.818	41.104	1.504	7.414	794	162	4.508	322.224	35.081	5.801	2.307	19.557	129.263	162	571.697	1.142.571	7	9.106	296.689	2.020.070	562.421	1.723.381
9	Autres industries civiles	93.118	13.330	2.305	22.171	23.684	3.946	225.962	51.584	1.014.435	219.296	17.799	87.039	92.426	1.725	1.868.820	715.456	93.716	469.577	1.171.338	4.318.907	1.966.566	3.147.569
10	Bâtiment et travaux publics	3.396	560	321	683	21.701	4.422	6.823	2.186	7.601	161.960	4.198	45.362	52.356	304	311.873	74.370	310	1.087.839	-	1.474.392	396.888	1.474.392
11	Transports industriels et collectifs	551	102	479	10.039	11.598	1.927	11.332	15.484	37.207	10.558	171.947	141.454	46.763	1.460	460.904	193.865	15.012	1.009	146.690	817.480	90.115	670.790
12	Commerces et services marchands	40.400	3.934	4.706	26.034	41.470	7.359	49.935	84.634	230.856	106.267	47.233	620.359	159.225	6.312	1.428.725	700.674	34.513	194.862	91.382	2.450.155	858.275	2.358.774
13	Services récréatifs, socio-culturels et publics	1.459	1.307	256	6.465	7.886	851	10.137	10.452	31.900	10.467	11.240	140.595	129.456	1.791	364.262	570.757	1.461.304	9.124	153.851	2.559.298	556.835	2.405.447
14	Assainissement, voirie, gestion des déchets	364	15	-	156	789	788	2.857	977	1.965	1.317	116	1.711	1.974	10.879	23.907	10.924	-	-	-	34.831	34.831	34.831
	<b>Production intermédiaire</b>	554.039	171.315	35.721	267.863	1.417.715	199.627	424.931	1.199.921	2.057.602	734.143	641.994	1.697.867	1.318.523	35.112	10.756.372	6.911.911	1.605.152	1.770.810	2.470.011	23.514.256	5.398.022	21.044.245
	<b>Imports (directs &amp; indirects)</b>	676.152	128.353	-	1.503	302.699	4.751.165	1.199.524	-	288.478	820.150	2.261.305	740.249	175.486	752.289	1.240.775	-	280					
	<b>Production finale</b>	1.230.191	299.667	34.218	570.561	6.168.880	1.399.152	136.454	2.020.070	4.318.907	1.474.392	817.480	2.450.155	2.559.298	34.831	23.514.256							
		<b>Dont déchets de la production intermédiaire</b>																<b>Dont autres déchets de la DF</b>					
		229.231	17.913	21.106	25.927	145.648	8.876	404.411	300.407	506.198	285.531	29.788	187.713	125.290	19.225	2.307.265	1.349.280	374.467	587.547	779.463	5.398.022		

Cette présentation entièrement déployée des postes de consommation des ménages du passif écologique comprend comme le tableau précédent les imports et les exports « directs et indirects », sachant que la colonne de synthèse du passif écologique, à droite, s'entend hors exports (directs et indirects).

Tableau 51 (figure 103) : Annexe du TES14 *biophysique* (Passif écologique) : La consommation des ménages écartée selon COICOP13

NAATI 4	TeraJoules - France 1999	Consom-mations intermé-diaires	01	02	03	04	05	06	07	08	10	11	09	12	13	COICOP13	ISBLM + APU	FBC	Exports (directs & indirects)	Demande finale (DF)	Dont déchets de la demande finale	Passif écologique (exergie) = DF - Exports
			Fruits, légumes, huiles, lait, graisses, fromages et œufs	Viandes, poissons et crustacés	Céréales, pain, pâtisseries, sucre, miel, confitures, chocolat & confiserie	Boissons chaudes, boissons non alcoolisées et autres produits alimentaires	Boissons alcoolisées et tabac	Articles d'habillement et chaussures	Eau, gaz, électricité, énergie bois et autres services aux logements	Meubles, articles de ménage et entretien de l'habitation	Santé	Transport	Education, communications et systèmes d'information	Hôtel, restaurant, loisirs, culture, tourisme int-ex	Autres biens et services (dont assurances)	Consom-mation des ménages						
1	Agriculture	726.926	191.754	-	3.721	-	-	-	4.245	-	-	16.871	-	115.984	-	332.574	-	14.893	155.798	1.230.191	193.081	1.074.393
2	Elevage	177.075	12.186	66.929	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1.898	-	81.013	-	3.628	37.952	299.667	112.379	261.716
3	Pêche, Aquaculture	9.513	-	21.829	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	21.829	-	-	2.875	34.218	12.130	31.343
4	Sylviculture et transformation du bois	330.709	-	-	-	-	-	-	8.014	74.580	-	-	-	65.105	-	147.699	26	28.934	63.193	570.561	147.347	507.368
5	Mise à disposition de l'énergie	3.587.801	-	-	-	-	-	-	1.149.125	-	-	1.139.112	-	-	-	2.288.237	264	47.941	340.519	6.168.880	395.409	5.828.360
6	Mise à disposition de l'eau	770.383	-	-	-	-	-	-	628.769	-	-	-	-	-	-	628.769	-	-	-	1.399.152	15.622	1.399.152
7	Mise à disposition des matières minérales	123.777	-	-	-	2.098	-	-	-	1.076	-	-	-	-	-	3.174	-	220	9.723	136.454	56.121	126.731
8	IAA et autres transformations de la biomasse agro-pastorale	571.697	154.467	254.721	165.993	83.429	191.151	256.451	-	20.810	1.133	-	-	14.418	-	1.142.571	7	9.106	296.689	2.020.070	562.421	1.723.381
9	Autres industries civiles	1.868.820	-	-	293	-	-	25.035	9.141	122.151	59.963	284.497	33.149	87.001	94.227	715.456	93.716	469.577	1.171.338	4.318.907	1.966.566	3.147.569
10	Bâtiment et travaux publics	311.873	-	-	-	-	-	-	74.370	-	-	-	-	-	-	74.370	310	1.087.839	-	1.474.392	396.888	1.474.392
11	Transports industriels et collectifs	460.904	-	-	-	-	-	-	-	-	-	185.956	399	7.510	-	193.865	15.012	1.009	146.690	817.480	90.115	670.790
12	Commerces et services marchands	1.428.725	-	-	-	-	-	981	468.701	6.224	-	55.103	2.110	17.874	149.681	700.674	34.513	194.862	91.382	2.450.155	858.275	2.358.774
13	Services récréatifs, socio-culturels et publics	364.262	-	-	-	-	-	4.949	5.035	22.803	63.430	5.795	92.158	269.623	106.964	570.757	1.461.304	9.124	153.851	2.559.298	556.835	2.405.447
14	Assainissement, voirie, gestion des déchets	23.907	-	-	-	-	-	-	10.924	-	-	-	-	-	-	10.924	-	-	-	34.831	34.831	34.831
	<b>Production intermédiaire</b>	<b>10.756.372</b>	<b>358.406</b>	<b>343.479</b>	<b>170.006</b>	<b>85.526</b>	<b>191.151</b>	<b>287.416</b>	<b>2.358.323</b>	<b>247.644</b>	<b>124.525</b>	<b>1.687.334</b>	<b>127.816</b>	<b>579.413</b>	<b>350.872</b>	<b>6.911.911</b>	<b>1.605.152</b>	<b>1.770.810</b>	<b>2.470.011</b>	<b>23.514.256</b>	<b>5.398.022</b>	<b>21.044.245</b>
	<b>Imports (directs &amp; indirects)</b>	<b>12.757.884</b>																				
	<b>Production finale</b>	<b>23.514.256</b>																				
			<b>Dont déchets de la demande finale (Ménages)</b>													<b>Dont autres déchets de la DF</b>						
		<b>2.307.265</b>	<b>77.672</b>	<b>103.756</b>	<b>46.932</b>	<b>24.091</b>	<b>53.219</b>	<b>84.220</b>	<b>283.797</b>	<b>88.259</b>	<b>41.419</b>	<b>246.266</b>	<b>35.928</b>	<b>145.110</b>	<b>118.610</b>	<b>1.349.280</b>	<b>374.467</b>	<b>587.547</b>	<b>779.463</b>	<b>5.398.022</b>		

La présentation en SUT déployée des résultats biophysiques, à la fois globale et avec un certain niveau de détail, nous permettra avant même le bilan final, de nombreuses extrapolations et analyses d'impact de la consommation par habitant, ou de la consommation des ménages, en regard de leurs consommations monétaires, de leur consommations de surfaces, etc..

**Commentaires :**Imports des branches :

La notion d'imports, qu'ils soient directs ou indirects, quand il s'agit de matières converties en exergie, est dans ce TES biophysique particulière et demande quelques explications.

Quand dans le TES monétaire il s'agit systématiquement d'imports venant de territoires étrangers, ces imports peuvent aussi supposer un transfert de matière de l'Ecosphère à l'Anthroposphère ou entre branches de production (le TES118 monétaire comprend d'ailleurs un poste transferts de branche, qui dans notre TES14 monétaire a été agrégé avec celui de la valeur ajoutée).

Pour les transferts entre l'Ecosphère et l'Anthroposphère, ce sont des matières naturelles qui ne sont pas transformées par les différentes activités.

Prenons l'exemple de la mise à disposition de l'eau (poste 6). Il y a ce que produisent des entreprises comme Veolia, qui fournissent un service de stockage (barrages), transport et adduction d'eau. Et il y a ce que coûtent ces services, en termes de matériel et d'énergie distribués par les autres branches et consommés par celle-ci.

Mais en sortie de leur production, elle ne produisent pas d'eau, comme des usines produisent des avions, ni n'importent d'eau de l'étranger ; elle ne font que la capter pour la mettre à notre disposition.

Ce captage devient alors un import depuis l'Ecosphère.

Pour les transferts entre branches de production, ce sont des sous produits d'un transformation qui ne peuvent être distribués par une branche, au sens du marché, comme des produits de son activité, mais transférés à une autre, à côté des lois du marché.

Prenons l'exemple du poste 10, Bâtiments et travaux publics. Dans le TES monétaire, ce poste ne comprend aucun imports, alors que dans le TES biophysique, ces imports sont quasiment égaux aux productions intermédiaires.

De quoi peut-il s'agir ? D'un produit qui ne peut être assimilé, ni à une production distribuée, ni à une importation directe, y compris de l'Ecosphère.

Ainsi en est-il du bitume, ou goudron, qui sert au revêtement des routes. C'est un déchet, très riche en énergie, du raffinage de pétrole (poste 5), qui ne saurait être comptablement (dans les statistiques énergétiques de l'OCDE par exemple) considéré comme un hydrocarbure distribué. Sauf que l'usage a établi son recyclage et l'a transformé en sous produit servant au revêtement des routes, qui sera dans ce cas transféré du poste 5 au poste 10 à des coûts très faibles, si ce n'est nuls ou négatifs.

Comme il en est aussi des mâchefers provenant de l'incinération des déchets et servant parfois au remblaiement des routes. Cet exemple est intéressant, car si les entreprises concernées comptabilisent « peut-être » son transport, ou celle de l'Ademe ses grands mouvements, les statistiques monétaires nationales ne sauraient faire quant à elles de ce déchet d'un déchet, ni un déchet, ni le produit vendu et distribué d'une entreprise spécifique. Nous sommes là face à un vide des statistiques officielles, car on ne les trouvera ni dans la production mise sur le marché, ni dans les statistiques déchets de l'OCDE.

Il y a enfin comme autre exemple les imports de l'agriculture, qui ne sauraient dans la proportion où on les trouve dans le TES biophysique, provenir entièrement de l'étranger, ni directement, ni indirectement. Et les tracteurs et autres matériels lourds

américains ne sont pas importés par l'agriculture, mais par le poste 9 (Autres industries civiles), ou 12 (Commerces et services marchands), qui les importent pour les vendre à l'agriculture. Il peut alors s'agir dans ce cas aussi d'un import d'eau qui ne passe pas par le poste 6 (Mise à disposition de l'eau), mais qui provient directement de l'Ecosphère, comme la pluie !

Il apparaît ainsi bien certain que la ligne imports du TES biophysique devrait faire l'objet futur d'un traitement spécifique approfondi.

#### Déchets des branches :

Les déchets, tels que nous les trouvons dans le tableau 49, ont été intégrés et répartis dans tout le TES biophysique (après avoir fait l'objet d'un TES spécifique non présenté ici), car ils sont émis au niveau de chacun de ses postes élémentaires. Ils sont donc invisibles dans le tableau.

Quant aux activités du poste 14 (Assainissement, voirie, gestion des déchets), il en est de même que pour l'eau, mais à l'inverse. Ce poste offre un service et non et non pas un produit : le ramassage, le traitement et le stockage des déchets, en fin de cycle économique. Les déchets ne sont que des masses externes traitées par ce poste, et ce qu'il consomme n'est que le produit distribué des autres postes (eau, énergie, matières diverses) qu'il renverra sous la forme de son propre service aux autres postes.

Il distribue un service, et ne saurait distribuer des déchets, comme la branche eau distribue l'eau importée de l'Ecosphère.

Pour ces deux raisons au moins les déchets, y compris les déchets humides et l'eau rejetée, bien qu'ils soient inclus dans le TES, ont été présentés à part. Ils réapparaîtront très explicitement dans les extrapolation du passif écologique du Territoire (tableau 60).

## 6.5 Résultats phase 2 : Le **Passif** *écologique* du Territoire

### 6.5.1 Le TES 14 *monétaire* complet du Territoire, et son annexe

Tableau 52 (figure 104) : TES 14 *monétaire* complet du Territoire

Parc Naturel Régional Préalpes d'Azur		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14							
NAATI4	ANNEXE TES14 M€ 1999	Agriculture	Élevage	Pêche, Aquaculture	Sylviculture et transformation du bois	Mise à disposition de l'énergie	Mise à disposition de l'eau	Mise à disposition des matières minérales	IAA et autres transformations de la biomasse agro-pastorale	Autres industries civiles	Bâtiment et travaux publics	Transports industriels et collectifs	Commerces et services marchands	Services récréatifs, socio-culturels et publics	Assainissement, voirie, gestion des déchets	Consommations intermédiaires	Consommation des ménages	ISBLM + APU	FBC	Exportations	Demande finale du territoire	
	1	Agriculture	10,01	3,60	-	0,10	0,21	-	-	23,90	0,36	1,59	-	-	3,10	-	42,87	19,70	-	0,88	9,19	72,64
2	Élevage	3,60	1,30	-	0,04	-	-	-	23,95	0,05	-	-	-	1,12	-	30,05	13,83	-	0,62	6,44	50,94	
3	Pêche, Aquaculture	-	-	0,01	-	-	-	-	1,56	0,06	-	0,02	0,00	0,76	-	2,41	5,56	-	-	0,73	8,69	
4	Sylviculture et transformation du bois	0,98	0,35	0,01	43,46	0,21	0,08	0,15	4,74	12,42	6,25	0,66	24,09	13,41	0,11	106,95	48,12	0,01	9,36	20,44	184,87	
5	Mise à disposition de l'énergie	3,17	1,14	0,48	2,57	48,40	0,47	0,46	4,39	20,15	4,61	15,13	20,10	15,26	0,31	136,66	86,55	0,01	1,83	12,97	234,37	
6	Mise à disposition de l'eau	0,46	0,17	0,02	0,11	0,18	1,34	0,01	0,45	0,69	0,13	0,07	0,62	1,89	0,03	6,16	4,99	-	-	-	11,15	
7	Mise à disposition des matières minérales	0,17	0,06	0,01	0,29	0,01	0,05	0,36	0,17	7,23	2,86	-	0,07	0,01	0,02	11,31	0,29	-	0,02	0,89	12,47	
8	IAA et autres transformations de la biomasse agro-pastorale	0,19	10,60	0,06	2,12	0,16	0,04	0,04	65,67	8,57	1,09	0,66	5,57	35,65	0,03	130,44	261,56	0,00	2,08	67,70	461,78	
9	Autres industries civiles	11,38	5,36	0,09	10,57	6,40	1,41	2,22	14,67	375,51	55,91	8,44	41,12	41,36	0,37	574,82	220,20	28,83	144,43	360,28	1.328,56	
10	Bâtiment et travaux publics	0,32	0,12	0,01	0,15	3,60	0,86	0,07	0,37	1,51	25,91	0,95	10,20	11,47	0,04	55,59	13,16	0,06	193,90	-	262,70	
11	Transports industriels et collectifs	0,05	0,02	0,02	1,77	1,59	0,30	0,11	2,18	5,92	1,41	30,21	24,82	8,04	0,18	76,61	32,01	2,50	0,17	24,38	135,67	
12	Commerces et services marchands	5,17	1,86	0,19	15,11	12,48	3,03	0,49	26,95	99,20	29,95	27,23	356,00	85,59	1,48	664,74	324,63	16,06	90,66	42,52	1.138,61	
13	Services récréatifs, socio-culturels et publics	0,17	0,44	0,01	2,54	1,90	0,26	0,10	2,63	10,11	2,39	4,39	54,72	48,18	0,35	128,20	201,70	514,31	3,21	54,15	901,57	
14	Assainissement, voirie, gestion des déchets	0,06	0,02	-	0,48	0,41	0,76	0,03	0,56	2,11	0,61	0,34	4,94	4,25	3,80	18,38	8,34	-	-	-	26,72	
	<b>Consommations intermédiaires</b>	<b>35,74</b>	<b>25,06</b>	<b>0,91</b>	<b>79,30</b>	<b>75,56</b>	<b>8,61</b>	<b>4,03</b>	<b>172,20</b>	<b>543,90</b>	<b>132,73</b>	<b>88,09</b>	<b>542,26</b>	<b>270,08</b>	<b>6,72</b>	<b>1.985</b>	<b>1.241</b>	<b>563,80</b>	<b>441,91</b>	<b>600,16</b>	<b>4.830,75</b>	
	Va production + transferts de branche	22,81	15,99	2,27	43,76	40,74	1,85	3,05	74,41	222,97	104,29	82,80	843,16	570,98	16,65	2.046						
	Importations de biens	6,39	4,48	1,71	26,84	32,16	-	2,37	64,53	325,95	-	-	-	-	-	464						
	Importations de services	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	25,79	39,38	33,97	-	99						
	Va de la commercialisation	7,61	5,34	3,77	34,60	86,52	0,72	3,02	149,77	235,60	25,78	60,81	284,82	25,71	3,41	236						
	<b>Produit final du territoire</b>	<b>72,55</b>	<b>50,86</b>	<b>8,66</b>	<b>184,51</b>	<b>234,98</b>	<b>11,18</b>	<b>12,47</b>	<b>460,92</b>	<b>1.328,42</b>	<b>262,80</b>	<b>135,88</b>	<b>1.139,98</b>	<b>900,74</b>	<b>26,78</b>	<b>4.830,75</b>						

Tableau 53 (figure 105) : Annexe du TES14 *monétaire* territorial : La consommation des ménages éclatée selon COICOP13

NAATI 4	Parc Naturel Régional Préalpes d'Azur														Consommation des ménages	ISBLM + APU	FBC	Exportations	Demande finale du territoire
	Consommations intermédiaires	01	02	03	04	05	06	07	08	10	11	09	12	13					
	ANNEXE TES14 M€ 1999	Fruits, légumes, huiles, lait, graisses, fromages et œufs	Viandes, poissons et crustacés	Céréales, pain, pâtisseries, sucre, miel, confitures, chocolat & confiserie	Boissons chaudes, boissons non alcoolisées et autres produits	Boissons alcoolisées et tabac	Articles d'habillement et chaussures	Eau, gaz, électricité, énergie bois et autres services aux logements	Meubles, articles de ménage et entretien de l'habitation	Santé	Transport	Education, communications et systèmes d'information	Hôtel, restaurant, loisirs, culture, tourisme inter-ex	Autres biens et services (dont assurances)					
1	Agriculture	42,87	11,37	-	0,22	-	-	0,25	-	-	0,99	-	6,88	-	19,70	-	0,88	9,19	72,64
2	Élevage	30,05	2,08	11,43	-	-	-	-	-	-	-	-	0,32	-	13,83	-	0,62	6,44	50,94
3	Pêche, Aquaculture	2,41	-	5,56	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	5,56	-	-	0,73	8,69
4	Sylviculture et transformation du bois	106,95	-	-	-	-	-	2,57	24,38	-	-	-	21,16	-	48,12	0,01	9,36	20,44	184,87
5	Mise à disposition de l'énergie	136,66	-	-	-	-	-	43,46	-	-	43,09	-	-	-	86,55	0,01	-	1,83	12,97
6	Mise à disposition de l'eau	6,16	-	-	-	-	-	4,99	-	-	-	-	-	-	4,99	-	-	-	11,15
7	Mise à disposition des matières minérales	11,31	-	-	-	0,19	-	-	0,10	-	-	-	-	-	0,29	-	-	0,02	12,47
8	IAA et autres transformations de la biomasse agro-pastorale	130,44	35,44	58,47	37,86	19,10	43,36	58,96	4,80	0,26	-	-	3,31	-	261,56	0,00	2,08	67,70	461,78
9	Autres industries civiles	574,82	-	-	0,09	-	-	7,76	2,79	37,98	18,46	86,90	10,22	26,90	220,20	28,83	144,43	360,28	1.328,56
10	Bâtiment et travaux publics	55,59	-	-	-	-	-	-	13,16	-	-	-	-	-	13,16	0,06	193,90	-	262,70
11	Transports industriels et collectifs	76,61	-	-	-	-	-	-	-	-	30,69	0,07	1,25	-	32,01	2,50	0,17	24,38	135,67
12	Commerces et services marchands	664,74	-	-	-	-	0,46	216,54	2,93	-	25,46	0,98	8,36	69,90	324,63	16,06	90,66	42,52	1.138,61
13	Services récréatifs, socio-culturels et publics	128,20	-	-	-	-	1,76	1,76	8,11	22,35	2,03	32,53	95,39	37,78	201,70	514,31	3,21	54,15	901,57
14	Assainissement, voirie, gestion des déchets	18,38	-	-	-	-	-	8,34	-	-	-	-	-	-	8,34	-	-	-	26,72
	<b>Consommations intermédiaires</b>	<b>1.985</b>	<b>48,89</b>	<b>75,46</b>	<b>38,17</b>	<b>19,29</b>	<b>43,36</b>	<b>68,94</b>	<b>293,87</b>	<b>78,30</b>	<b>41,07</b>	<b>189,15</b>	<b>43,80</b>	<b>163,58</b>	<b>1.241</b>	<b>563,80</b>	<b>441,91</b>	<b>600,16</b>	<b>4.830,75</b>

6.5.2 Le Passif *écologique* du Territoire, reflet *biophysique* du TES *monétaire*

Tableau 54 (figure 106) : TES14 *biophysique* complet du Territoire, ou **Passif *écologique***

NAAT14	NAAT14														Consom-mations intermé-diaires	Consom-mation des ménages	ISBLM + APU	FBC	Exports (directs & indirects)	Demande finale (DF)	Dont déchets de la demande finale	Passif <i>écologique</i> (exergie) = DF - Exports															
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14																							
TeraJoules - PNRPA 1999																																					
	Agriculture	Elevege	Pêche, Aquaculture	Sylviculture et transformation du bois	Mise à disposition de l'énergie	Mise à disposition de l'eau	Mise à disposition des matières minérales	IAA et autres transformations de la biomasse agro-pastorale	Autres industries civiles	Bâtiment et travaux publics	Transports industriels et collectifs	Commerces et services marchands	Services récréatifs, socio-culturels et publics	Assainis-sement, voirie, gestion des déchets																							
1	Agriculture	347,51	90,73	-	2,48	5,79	-	-	642,84	9,16	43,84	-	-	76,61	-	1.219	560	-	24,97	261,25	2.065	324	1.804														
2	Elevege	61,03	9,57	-	0,24	-	-	-	217,95	0,38	-	-	-	7,75	-	297	137	-	6,08	63,64	503	189	440														
3	Pêche, Aquaculture	-	-	0,43	-	-	-	-	11,26	0,34	-	0,08	-	3,83	-	16	37	-	-	4,82	58	20	53														
4	Sylviculture et transformation du bois	14,36	1,79	0,57	191,00	1,50	0,46	26,52	32,07	67,16	46,61	2,92	106,66	62,01	0,93	555	250	0,04	48,52	105,97	959	248	853														
5	Mise à disposition de l'énergie	164,93	48,48	38,70	107,11	2.150,72	20,08	97,21	193,87	861,63	206,78	631,90	839,63	640,80	14,42	6.016	3.810	0,44	80,39	571,01	10.318	661	9.747														
6	Mise à disposition de l'eau	100,88	34,75	3,72	22,67	38,16	280,97	1,89	94,19	143,35	27,96	14,30	129,08	394,58	5,34	1.292	1.047	-	-	-	2.339	26	2.339														
7	Mise à disposition des matières minérales	3,72	0,75	0,42	3,31	0,19	0,61	64,49	2,39	89,38	41,17	-	0,82	0,08	0,24	208	5	-	0,37	16,30	229	94	213														
8	IAA et autres transformations de la biomasse agro-pastorale	3,05	68,93	2,52	12,43	1,33	0,27	7,56	540,33	58,83	9,73	3,87	32,79	216,76	0,27	959	1.922	0,01	15,27	497,51	3.394	945	2.896														
9	Autres industries civiles	156,15	22,35	3,87	37,18	39,72	6,62	378,91	86,50	1.701,08	367,73	29,85	145,95	154,99	2,89	3.134	1.200	157,15	787,42	1.964,18	7.243	3.298	5.279														
10	Bâtiment et travaux publics	5,69	0,94	0,54	1,15	36,39	7,42	11,44	3,66	12,75	271,59	7,04	76,07	87,79	0,51	523	124	0,52	1.824,17	-	2.471	665	2.471														
11	Transports industriels et collectifs	0,92	0,17	0,80	16,83	19,45	3,23	19,00	25,97	62,39	17,70	288,33	237,20	78,42	2,45	773	323	25,17	1,69	245,98	1.369	151	1.123														
12	Commerces et services marchands	67,75	6,60	7,89	43,66	69,54	12,34	83,73	141,92	387,12	178,20	79,20	1.040,26	267,00	10,58	2.396	1.170	57,87	326,76	153,24	4.104	1.437	3.950														
13	Services récréatifs, socio-culturels et publics	2,45	2,19	0,43	10,84	13,22	1,43	17,00	17,53	53,49	17,55	18,85	235,76	217,08	3,00	611	961	2.450,42	15,30	257,99	4.296	935	4.038														
14	Assainissement, voirie, gestion des déchets	0,61	0,02	-	0,26	1,32	1,32	4,79	1,64	3,29	2,21	0,19	2,87	3,31	18,24	40	18	-	-	-	58	58	58														
<b>Production intermédiaire</b>															929	287	60	449	2.377	335	713	2.012	3.450	1.231	1.077	2.847	2.211	59	18.037	11.564	2.692	2.969	4.142	39.404	9.052	35.263	
<b>Imports (directs &amp; indirects)</b>															1.136	216	2	509	7.940	2.004	484	1.382	3.793	1.240	292	1.257	2.085	1	21.367								
<b>Production finale (dont imports directs)</b>															2.065	503	58	959	10.318	2.339	229	3.394	7.243	2.471	1.369	4.104	4.296	58	39.404								
<b>Dont déchets de la production intermédiaire</b>																									<b>Dont autres déchets de la DF</b>												
															384,39	30,04	35,39	43,48	244,23	14,88	678,15	503,74	848,83	478,80	49,95	314,77	210,10	32,24	3.869	2.263	627,93	985,24	1.307,06	9.052			

Tableau 55 (figure 107) : Annexe du TES14 *biophysique* (Passif écologique du Territoire) : La consommation des ménages éclatée selon COICOP13

NAATI 4	NAATI4 TeraJoules - PNRPA 1999	Consom- mations intermé- diaires	01	02	03	04	05	06	07	08	10	11	09	12	13	COICOP13	ISBLM + APU	FBC	Exports (directs & indirects)	Demande finale (DF)	Dont déchets de la demande finale	Passif écologique (exergie) = DF - Exports
			Fruits, légumes, huiles, lait, grais- sages et fromages et œufs	Viandes, poissons et crustacés	Céréales, pain, pâtisseries, sucre, miel, confitures, chocolat & confiserie	Boissons chaudes, boissons non alcoolisées et autres produits alimentaires	Boissons alcoolisées et tabac	Articles d'habillement et chaussures	Eau, gaz, électricité, énergie bois et autres services aux logements	Meubles, articles de ménage et entretien de l'habitation	Santé	Transport	Education, communications et systèmes d'information	Hôtel, restaurant, loisirs, culture, tourisme int-ex	Autres biens et services (dont assurances)	Consom- mation des ménages						
1	Agriculture	1.219	323,31	-	6,24	-	-	-	7,07	-	-	28,09	-	195,51	-	560	-	24,97	261,25	2.065	324	1.804
2	Élevage	297	20,55	112,92	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3,20	-	137	-	6,08	63,64	503	189	440
3	Pêche, Aquaculture	16	-	36,83	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	37	-	-	4,82	58	20	53
4	Sylviculture et transformation du bois	555	-	-	-	-	-	-	13,34	126,43	-	-	-	109,74	-	250	0,04	48,52	105,97	959	248	853
5	Mise à disposition de l'énergie	6.016	-	-	-	-	-	-	1.913,40	-	-	1.896,82	-	-	-	3.810	0,44	80,39	571,01	10.318	661	9.747
6	Mise à disposition de l'eau	1.292	-	-	-	-	-	-	1.046,96	-	-	-	-	-	-	1.047	-	-	-	2.339	26	2.339
7	Mise à disposition des matières minérales	208	-	-	-	3,53	-	-	-	1,82	-	-	-	-	-	5	-	0,37	16,30	229	94	213
8	IAA et autres transformations de la biomasse agro-pastorale	959	260,44	429,74	278,25	140,34	318,68	433,33	-	35,28	1,90	-	-	24,30	-	1.922	0,01	15,27	497,51	3.394	945	2.896
9	Autres industries civiles	3.134	-	-	0,49	-	-	42,30	15,22	207,07	100,66	473,74	55,74	146,65	158,58	1.200	157,15	787,42	1.964,18	7.243	3.298	5.279
10	Bâtiment et travaux publics	523	-	-	-	-	-	-	123,83	-	-	-	-	-	-	124	0,52	1.824,17	-	2.471	665	2.471
11	Transports industriels et collectifs	773	-	-	-	-	-	-	-	-	-	309,65	0,67	12,66	-	323	25,17	1,69	245,98	1.369	151	1.123
12	Commerces et services marchands	2.396	-	-	-	-	-	1,66	780,43	10,55	-	91,76	3,55	30,13	251,91	1.170	57,87	326,76	153,24	4.104	1.437	3.950
13	Services récréatifs, socio-culturels et publics	611	-	-	-	-	-	8,36	8,38	38,66	106,48	9,65	154,97	454,49	180,02	961	2.450,42	15,30	257,99	4.296	935	4.038
14	Assainissement, voirie, gestion des déchets	40	-	-	-	-	-	-	18,19	-	-	-	-	-	-	18	-	-	-	58	58	58
<b>Production intermédiaire</b>		18.037	604,30	579,49	284,98	143,87	318,68	485,66	3.926,82	419,80	209,05	2.809,70	214,93	976,69	590,51	11.564	2.692	2.969	4.142	39.404	9.052	35.263
<b>Imports (directs &amp; indirects)</b>		21.367																				
<b>Production finale (dont imports directs)</b>		39.404																				
<b>Dont déchets de la demande finale des ménages</b>																<b>Dont autres déchets de la DF</b>						
		3.869	130,96	175,05	78,67	40,52	88,73	142,31	472,55	149,61	69,53	410,08	60,42	244,61	199,62	2.263	627,93	985,24	1.307,06	9.052		

## 6.6 Extrapolations du **Passif** *écologique*

Les cadres généraux de calcul du passif écologique sont identiques, à l'échelle nationale ou d'un sous territoire. Il en résulte qu'à chaque échelle, et avant même d'aborder le bilan écologique, nous pourrions à priori en tirer des extrapolations de même nature.

Mais pour ne point saturer notre lecteur, et aussi du fait que l'actif écologique a été calculé à l'échelle de notre territoire de référence, nous diviserons nos extrapolations en deux parties :

- Extrapolations du Passif écologique national
- Extrapolations du Passif écologique du Territoire

Elles seront plus ou moins significatives selon que l'on s'adresse aux statistiques nationales ramenées à l'habitant, ou à l'échelle d'une collectivité locale constituée d'un ensemble de ménages urbains intégrés dans, ou confrontés à leur environnement.

### 6.6.1 Extrapolations du Passif écologique de la France

Nous avons précisé que nous avons conçu la NAAT 14 de telle manière à pouvoir utiliser et/ou croiser 3 types de données relatives à la consommation et à la production :

1. Les données monétaires,
2. Les données matière/énergie, représentées par l'exergie,
3. Les données territoriales relatives à la production matérielle, significativement représentées par les surfaces spécifiques (de type CLC) allouées ou allouables aux différents secteurs d'activité du TES, à l'exemple primaire des surfaces agricoles et forestières.

De ces différentes données ou de leur croisement, nous pouvons d'ores et déjà tirer, avant même d'aborder le bilan final, un nombre considérable de ratios utiles à l'analyse, au diagnostic territorial et à la décision.

L'échelle standardisée, à la fois globale et détaillée, du TES14 nous permet en effet une représentation intégrée autorisant toutes relations de cause à effet à l'intérieur d'un même tableau ou entre ceux-ci.

Nous aborderons ici dans une courte présentation quelques résultats et croisements, en forme de tableaux de synthèse.

6.6.1.1 Passif *écologique* de la France, en Tep (exergie) / habitant, directes & indirectesTableau 56 (figure 108) : Passif *écologique* de la France, en Tep/habitant : A - Consommations intermédiaires

NAATI4	Tep/habitant - France 1999														Consommations intermédiaires	Consommation des ménages	ISBLM + APU	FBC	Exports (directs & indirects)	Demande finale (DF)	Passif <i>écologique</i> = DF - Exports	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14								
	Agriculture	Élevage	Pêche, Aquaculture	Sylviculture et transformation du bois	Mise à disposition de l'énergie	Mise à disposition de l'eau	Mise à disposition des matières minérales	IAA et autres transformations de la biomasse agro-pastorale	Autres industries civiles	Bâtiment et travaux publics	Transports industriels et collectifs	Commerces et services marchands	Services récréatifs, socio-culturels et publics	Assainissement, voirie, gestion des déchets								
1	0,084	0,022	-	0,001	0,001	-	-	0,156	0,002	0,011	-	-	0,019	-	0,295	0,135	-	0,006	0,063	0,499	0,436	
2	0,015	0,002	-	0,000	-	-	-	0,053	0,000	-	-	-	0,002	-	0,072	0,033	-	0,001	0,015	0,122	0,106	
3	-	-	0,000	-	-	-	-	0,003	0,000	-	0,000	0,000	0,001	-	0,004	0,009	-	-	0,001	0,014	0,013	
4	0,003	0,000	0,000	0,046	0,000	0,000	0,006	0,008	0,016	0,011	0,001	0,026	0,015	0,000	0,134	0,060	0,000	0,012	0,026	0,231	0,206	
5	0,040	0,012	0,009	0,026	0,520	0,005	0,024	0,047	0,208	0,050	0,153	0,203	0,155	0,003	1,456	0,928	0,000	0,019	0,138	2,503	2,365	
6	0,024	0,008	0,001	0,005	0,009	0,068	0,000	0,023	0,035	0,007	0,003	0,031	0,095	0,001	0,313	0,255	-	-	-	0,568	0,568	
7	0,001	0,000	0,000	0,001	0,000	0,000	0,016	0,001	0,022	0,010	-	0,000	0,000	0,000	0,050	0,001	-	0,000	0,004	0,055	0,051	
8	0,001	0,017	0,001	0,003	0,000	0,000	0,002	0,131	0,014	0,002	0,001	0,008	0,052	0,000	0,232	0,464	0,000	0,004	0,120	0,820	0,699	
9	0,038	0,005	0,001	0,009	0,010	0,002	0,092	0,021	0,412	0,089	0,007	0,035	0,037	0,001	0,758	0,290	0,038	0,191	0,475	1,752	1,277	
10	0,001	0,000	0,000	0,000	0,009	0,002	0,003	0,001	0,003	0,066	0,002	0,018	0,021	0,000	0,127	0,030	0,000	0,441	-	0,598	0,598	
11	0,000	0,000	0,000	0,004	0,005	0,001	0,005	0,006	0,015	0,004	0,070	0,057	0,019	0,001	0,187	0,079	0,006	0,000	0,060	0,332	0,272	
12	0,016	0,002	0,002	0,011	0,017	0,003	0,020	0,034	0,094	0,043	0,019	0,252	0,065	0,003	0,580	0,284	0,014	0,079	0,037	0,994	0,957	
13	0,001	0,001	0,000	0,003	0,003	0,000	0,004	0,004	0,013	0,004	0,005	0,057	0,053	0,001	0,148	0,232	0,593	0,004	0,062	1,038	0,976	
14	0,000	0,000	-	0,000	0,000	0,000	0,001	0,000	0,001	0,000	0,001	0,001	0,001	0,004	0,010	0,004	-	-	-	0,014	0,014	
	<b>Production intermédiaire</b>	0,225	0,070	0,014	0,109	0,575	0,081	0,172	0,487	0,835	0,298	0,260	0,689	0,535	0,014	4,364	2,804	0,651	0,718	1,002	9,540	8,538
	<b>Imports directs &amp; indirects</b>	0,274	0,052	- 0,001	0,123	1,928	0,487	- 0,117	0,333	0,917	0,300	0,071	0,305	0,503	- 0,000	5,176						
	<b>Production finale (PF)</b>	0,499	0,122	0,014	0,231	2,503	0,568	0,055	0,820	1,752	0,598	0,332	0,994	1,038	0,014	9,540						
	<b>Dont déchets de la production intermédiaire</b>																<b>Dont autres déchets de la DF</b>					
		0,093	0,007	0,009	0,011	0,059	0,004	0,164	0,122	0,205	0,116	0,012	0,076	0,051	0,008	0,936	0,547	0,152	0,238	0,316	2,190	

© R.Loiret 2015 - Résultats de recherche doctorale, sous toutes réserves

Tableau 57 (figure 109) : Passif *écologique* de la France, en Tep/habitant : B - Consommation des ménages

NAATI4	Tep/habitant - France 1999														COICOP13	Consommation des ménages	ISBLM + APU	FBC	Exports (directs & indirects)	Demande finale (DF)	Passif <i>écologique</i> = DF - Exports
	01	02	03	04	05	06	07	08	10	11	09	12	13								
	Fruits, légumes, huiles, lait, graisses, fromages et œufs	Viandes, poissons et crustacés	Céréales, pain, pâtisseries, sucre, miel, confitures, chocolat & confiserie	Boissons chaudes, boissons non alcoolisées et autres produits alimentaires	Boissons alcoolisées et tabac	Articles d'habillement et chaussures	Eau, gaz, électricité, énergie bois et autres services aux logements	Meubles, articles de ménage et entretien de l'habitation	Santé	Transport	Éducation, communications et systèmes d'information	Hôtel, restaurant, loisirs, culture, tourisme int-ex	Autres biens et services (dont assurances)								
1	0,295	0,078	-	0,002	-	-	-	0,002	-	-	0,007	-	0,047	-	0,135	-	0,006	0,063	0,499	0,436	
2	0,072	0,005	0,027	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,033	-	0,001	0,015	0,122	0,106	
3	0,004	-	0,009	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,009	-	-	0,001	0,014	0,013	
4	0,134	-	-	-	-	-	0,003	0,030	-	-	-	0,026	-	-	0,060	0,000	0,012	0,026	0,231	0,206	
5	1,466	-	-	-	-	-	-	0,466	-	-	0,462	-	-	-	0,928	0,000	0,019	0,138	2,503	2,365	
6	0,313	-	-	-	-	-	-	0,255	-	-	-	-	-	-	0,255	-	-	-	0,568	0,568	
7	0,050	-	-	0,001	-	-	-	0,000	-	-	-	-	-	-	0,001	-	0,000	0,004	0,055	0,051	
8	0,232	0,063	0,103	0,067	0,034	0,078	0,104	-	0,008	0,0005	-	0,006	-	-	0,464	0,000	0,004	0,120	0,820	0,699	
9	0,758	-	-	0,000	-	-	0,010	0,004	0,050	0,024	0,115	0,013	0,035	0,038	0,290	0,038	0,191	0,475	1,752	1,277	
10	0,127	-	-	-	-	-	-	0,030	-	-	-	-	-	-	0,030	0,000	0,441	-	0,598	0,598	
11	0,187	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,075	0,000	0,003	-	0,079	0,006	0,000	0,060	0,332	0,272	
12	0,580	-	-	-	-	0,000	0,190	0,003	-	0,022	0,001	0,007	0,061	0,284	0,014	0,079	0,037	0,994	0,957		
13	0,148	-	-	-	-	0,002	0,002	0,009	0,026	0,002	0,037	0,109	0,043	0,232	0,593	0,004	0,062	1,038	0,976		
14	0,010	-	-	-	-	-	0,004	-	-	-	-	-	-	0,004	-	-	-	-	0,014	0,014	
	<b>Production intermédiaire</b>	4,364	0,145	0,139	0,069	0,035	0,078	0,117	0,957	0,100	0,051	0,685	0,052	0,235	0,142	2,804	0,651	0,718	1,002	9,540	8,538
	<b>Dont déchets de la demande finale (Ménages)</b>																<b>Dont autres déchets de la DF</b>				
		0,936	0,032	0,042	0,019	0,010	0,022	0,034	0,115	0,036	0,017	0,100	0,015	0,059	0,048	0,547	0,152	0,238	0,316	2,190	

© R.Loiret 2015 - Résultats de recherche doctorale, sous toutes réserves

### 6.6.1.2 Intensité énergétique (exergie) de la monnaie, intensité monétaire des échanges de masse et énergie

Du croisement des données monétaires et matière/énergie (exergie), nous pourrions tirer de très multiples ratios d'intensité énergétique des échanges monétaires, et inversement d'intensité monétaire des échanges de masse et d'énergie. Ce qui est bien au fondement de toute économie, et s'avèrera primordial pour toutes tendances et projections nationales.

Les ratios du tableau suivant nous en donnent quelques exemples, analytiquement extensibles à l'ensemble des postes des TES 14 monétaires et biophysiques, et temporellement extensibles à toutes études historiques et prospectives.

Notons, comparativement aux autres postes, l'intensité énergétique des échanges monétaires concernant les déchets « sous contrôle économique », une fois ceux-ci collectés et ramenés à leurs centres de traitement spécifiques.

Tableau 58 (figure 110) : TES 14 monétaires et biophysiques - Quelques ratios d'intensité monnaie/exergie et exergie/monnaie

France 1999		NAAT14	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14		
Formules	Unités	Agriculture	Elevage	Pêche, Aquaculture	Sylviculture et transformation du bois	Mise à disposition de l'énergie	Mise à disposition de l'eau	Mise à disposition des matières minérales	IAA et autres transformations de la biomasse agro-pastorale	Autres industries civiles	Bâtiment et travaux publics	Transports industriels et collectifs	Commerces et services marchands	Services récréatifs, socio-culturels et publics	Assainissement, voirie, gestion des déchets	Totaux		
<b>Résultats des TES 14 monétaires et biophysiques</b>																		
Consommations de matière et d'énergie	(1)	M€	21.314	14.942	542	47.293	45.060	5.135	2.406	102.693	324.353	79.151	52.535	323.377	161.064	4.006	1.183.871	
	(2)	TJ	554.039	171.315	35.721	267.863	1.417.715	199.627	424.931	1.199.921	2.057.602	734.143	641.994	1.697.867	1.318.523	35.112	10.756.372	
Dont production de déchets		TJ	229.231	17.913	21.106	25.927	145.648	8.876	404.411	300.407	506.198	285.531	29.788	187.713	125.290	19.225	2.307.265	
<b>Production finale</b>																		
Consommations de matière et d'énergie	(3)	M€	43.268	30.331	5.165	110.034	140.128	6.669	7.438	274.868	792.204	156.718	81.029	679.827	537.157	15.971	2.880.807	
	(4)	TJ	1.230.191	299.667	34.218	570.561	6.168.880	1.399.152	136.454	2.020.070	4.318.907	1.474.392	817.480	2.450.155	2.559.298	34.831	23.514.256	
Dont production de déchets		TJ	193.081	112.379	12.130	147.347	395.409	15.622	56.121	562.421	1.966.566	396.888	90.115	858.275	556.835	34.831	5.398.022	
<b>Ratios d'intensité énergétique (exergie) du TES monétaire</b>																		
Moyennes																		
Consommations de matière et d'énergie	(5) = (2)/(1)	TJ/M€ ou MJ/€	25,99	11,47	65,91	5,66	31,46	38,88	176,61	11,68	6,34	9,28	12,22	5,25	8,19	8,76	9,09	
	1/(5)	M€/TJ ou €/MJ	0,038	0,087	0,015	0,177	0,032	0,026	0,006	0,086	0,158	0,108	0,082	0,190	0,122	0,114	0,11	
<b>Production finale</b>																		
Consommations de matière et d'énergie	(6) = (4)/(3)	TJ/M€ ou MJ/€	28,43	9,88	6,62	5,19	44,02	209,80	18,35	7,35	5,45	9,41	10,09	3,60	4,76	2,18	8,16	
	1/(6)	M€/TJ ou €/MJ	0,035	0,101	0,151	0,193	0,023	0,005	0,055	0,136	0,183	0,106	0,099	0,277	0,210	0,459	0,12	
<b>Production finale</b>																		
																Tous déchets rapportés à leurs centres de traitement spécifique*	337,99	MJ/€
																	0,003	€/MJ

\* Production finale totale de déchets en TJ rapportée au poste 14/Production finale du poste 14 en M€

### 6.6.1.3 Tension de surface, DSe, DSeg, indice d'autonomie territoriale

Tout comme nous avons réalisé un TES14 spécifique aux déchets, nous avons fait de même pour les surfaces du territoire national (et local de référence), après avoir réagré les 44 postes de nomenclature CLC relativement aux 14 postes de la NAAT (première ligne du tableau ci-dessous).

Comparée aux résultats du TES14 biophysique, la seule allocation des surfaces territoriales à la NAAT14 nous permet diverses extrapolations relatives à l'intensité énergétique, en  $J.m^{-2}$  des différentes surfaces affectées aux activités du territoire, cette intensité énergétique pouvant littéralement s'interpréter comme une « tension de surface (économique) » ( $N.m^{-1}$ ), comme nous l'avons vu au [paragraphe 3.3.2](#).

Tableau 59 (figure 111) : Demande en surfaces directes et indirectes, Indice d'autonomie territoriale

France 1999	NAAT14	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	Nombre d'habitants France 1999 : 58.871.811					
	Formules	Agriculture	Elevage	Pêche, Aquaculture	Sylviculture et transformation du bois	Mise à disposition de l'énergie	Mise à disposition de l'eau	Mise à disposition des matières minérales	IAA et autres transformations de la biomasse agro-pastorale	Autres industries civiles	Bâtiment et travaux publics	Transports industriels et collectifs	Commerces et services marchands	Services récréatifs, socio-culturels et publics	Assainissement, voirie, gestion des déchets	Totaux	Moyennes et ratios				
Surfaces du territoire (CLC 2000 rapporté à la NAAT14)	(1)	24.211.879	9.977.558	25.766	15.569.403	60.951	306.979	92.314	286.559	31.840	9.234	94.009	2.085.059	2.174.325	7.628	54.943.504	Ha	0,933	Ha/habitant		
Production intermédiaire (Prod. intérieure hors imports du TES14 exergie)	(2)	554.039	171.315	35.721	267.863	1.417.715	199.627	424.931	1.199.921	2.057.602	734.143	641.994	1.697.867	1.318.523	35.112	10.756.372	TJ	0,183	TJ/habitant		
Surfaces théoriques du territoire réquisitionnées par la production intermédiaire	(3)	7.037.931	2.564.882	4.023	6.503.953	256.716	94.516	29.458	22.459.116	2.662.023	1.986.817	306.321	5.647.057	5.361.024	29.667	54.943.504	Ha		Ha/habitant		
Tension de surface économique	(4) = (2)/(3)	0,079	0,067	8,879	0,041	5,522	2,112	14,425	0,053	0,773	0,370	2,096	0,301	0,246	1,184				0,196	TJ/Ha [2]	
Tension de surface économique des seuls déchets mis en décharge		= Total déchets de la production intermédiaire (2.307.265 TJ) / surface réquisitionnée du poste 14															78	TJ/Ha [2]			
Productivité exergetique moyenne théorique des écosystèmes gérés	(5) = →	X	X	X	X		X	X											→ (5) = $\Sigma(1\text{à}4 \text{ \& } 6\text{à}7)$ de (2) / $\Sigma(1\text{à}4 \text{ \& } 6\text{à}7)$ de (3)	0,102	TJ/Ha [2]
Passif écologique (Prod. intermédiaire + imports - exports du TES14)	(6)	1.230.191	299.667	34.218	570.561	6.168.880	1.399.152	136.454	2.020.070	4.318.907	1.474.392	817.480	2.450.155	2.559.298	34.831	23.514.256	TJ	0,399	TJ/habitant		
DSe = Demande finale en surfaces économiques	(7) = (6)/(4)	15.627.067	4.486.545	3.854	13.853.749	1.117.045	662.448	9.459	37.809.993	5.587.586	3.990.156	390.052	8.149.148	10.405.927	29.431	102.122.460	eHa [3]	1,735	eHa/habitant		
DSeg [1] = Demande finale en surfaces équivalentes d'écosystèmes gérés	(8) = (6)/moy(5)	12.078.569	2.942.268	335.968	5.602.029	60.568.835	13.737.501	1.339.764	19.833.958	42.404.972	14.476.243	8.026.389	24.056.727	25.128.337	341.991	230.873.552	eiHa [4]	3,922	eiha/habitant		
Demande finale en hectares globaux (gha)	Résultats antérieurs [5]	Note : Les gha sont des hectares de productivité industrielle moyenne													Empreinte écologique 1999 (standard GFN), pour mémoire		290.718.235	gHa	4,938	gha/habitant	
Taux de couverture du Passif écologique par les écosystèmes industriels	(9) = (1) / (8)															Indice d'autonomie territoriale			0,238		

[1] Ou Passif écologique en surfaces écosystémiques de production industrielle

[2] TJ/Ha ou 100MJ/m<sup>2</sup> ou 100MN/m

[3] eHa = Ha économiques (selon tension de surface)

[4] eiHa = Ha équivalents d'écosystèmes industriels

[5] EF GFN France 1999

Cette tension de surface économique nous aura permis d'établir plusieurs ratios essentiels du passif écologique qui appellent à commentaire.

**Commentaires :**

- Préalables sur les propriétés de la SUT biophysique :

Comme nous l'avons déjà commenté, le TES14 établi sous forme de « SUT » a ceci de particulier qu'il peut être lu de manière verticale et horizontale (cf. figure 91). Cette propriété rapportée à la SUT biophysique nous permet d'encadrer le recensement des données et d'éviter de très nombreuses erreurs.

Ainsi, les imports directs et indirects de chaque poste du TES14 biophysique ajoutés à la consommation verticale (ou production intermédiaire) de ce poste, nous donnent sa production finale qui, ensuite distribuée horizontalement, sera égale à la demande finale concernant ce même poste (cf. tableaux 50 et 51).

Mais en précisant que les postes consomment verticalement un prorata de la production des autres postes, et distribuent horizontalement leur propre production.

Un telle transposition, fondée sur les valeurs monétaires, est absolument impossible en données matière strictes (masse, volume, énergie), car elle consisterait à sommer des carottes, des tracteurs, du gasoil et des bâtiments pour générer de la viande.

Mais elle devient en théorie possible avec les valeurs en exergie, car celles-ci rendent compte, comme nous l'avons déjà montré et le montrerons encore, du principe thermodynamique fondamental de « conservation de l'énergie ». Ainsi l'exergie totale (et la masse) reste égale, quelles que soient les « transformations biophysiques ». On reverra pour ce faire le tableau 34, qui trouve peut être en cela sa plus grande raison d'être, sachant que nous établirons plus loin une « stœchiométrie urbaine » qui aura vocation à vérifier ce même principe de conservation de l'énergie pour le passif écologique territorial.

Ces propriétés de la SUT biophysique nous autorisent ainsi à tirer les divers ratios du tableau 59 :

- Tension de surface économique :

C'est pour chaque type de surface affectée son intensité en TJ.ha<sup>-1</sup>. Elle est dite « économique » parce qu'elle est directement tirée du TES14 biophysique, supposé refléter l'économie nationale.

On notera parmi celles-ci la tension de surface spécifique des « décharges », que nous avons déduite de l'exergie des déchets de la production intermédiaire (tableau 50) divisée par la surface « réquisitionnée » du poste 14, soit 78 TJ/ha, c'est à dire environ 400 fois plus que la tension de surface économique moyenne.

- Productivité exergétique moyenne théorique des écosystèmes gérés :

Les écosystèmes gérés sont toutes les surfaces productives de l'Ecosphère (écosystèmes et biogéocénoses naturels) passées sous contrôle direct de l'économie industrielle, à l'exemple de l'agriculture et de l'élevage. Ce sont dans notre tableau les postes 1 à 4 et 6 à 7 des surfaces CLC rapportée la NAAT. La logique de la SUT biophysique aura « par convention » rendus égaux en exergie la somme de leurs consommations intermédiaires et de leurs imports, directs et indirects, à la somme de leur production distribuée (y compris les déchets, inclus dans le TES 14 biophysique).

La production « intérieure » (nationale) en exergie de ces postes, sera dès lors assimilable à leur production finale - leurs imports, c'est à dire à la production intermédiaire. Rapportée aux surfaces de production effectivement « réquisitionnées » par les différents postes de la NAAT (ainsi par exemple, comme on peut le voir sur les tableaux 50 et 51, l'agriculture distribue une certaine partie de ses productions pour la consommation finale directe des ménages, mais en consacre une très grande partie aux

Industries Agricoles et Alimentaires), ceci nous donnera leur productivité exergétique théorique moyenne en divisant la somme de leurs production en exergie par la somme de leurs surfaces allouées.

- Demande finale en surfaces économiques (DSe) :

Ayant des surfaces nationales allouées à la production nationale (intermédiaire), il est parfaitement logique que tous nos imports directs et indirects correspondent à des surfaces de production de nature similaire d'autres pays. Le parti pris étant ici de considérer que ces surfaces « importées » ont la même productivité moyenne que les surfaces françaises (l'économie mondiale ayant tendance à tout égaliser), la DSe consiste tout simplement à évaluer la demande finale en surfaces « de toutes nature » compte tenu de notre demande finale nationale en exergie, imports directs et indirects inclus.

Cette DSe est calculée en « eha », c'est à dire les hectares de tension de surface économique standard de tous les postes de la NAAT.

- Demande finale en surfaces équivalentes d'écosystèmes gérés (DSeg) :

C'est cette même demande finale en surface, mais essentiellement rapportée à la productivité moyenne des écosystèmes industriels, qui devient au sens strict une « fertilité économique » vue l'intensité exergétique contenue (ou tension de surface) en divers ingrédients industriels et fossiles de ces écosystèmes.

Notons ici que la DSeg, estimée en « egha » (hectares d'écosystèmes gérés) est un concept extrêmement proche des « gha » (hectares globaux) de l'Empreinte écologique, qui ne calcule, comme nous l'avons précisé en introduction de notre thèse, la biocapacité des territoires qu'en se basant sur cette productivité moyenne des écosystèmes industriels.

Ceci nous permet d'établir une comparaison directe dans notre tableau et de constater une proximité certaine des résultats. Mais qui sera bien plus importante si nous retirons de la valeur standard du GFN pour la France en 1999 (4,938 gha), la part correspondant à l'industrie nucléaire (0,706 gha). Ce qui nous amènera finalement à comparer nos 3,922 egha aux 4,232 gha du GFN hors industries nucléaires, et attestera d'une grande convergence des données agrégées du calcul général, de l'Eed'une part, du Passif écologique de l'autre.

Mais notre comparaison s'arrête là !

Car pour notre part, quand nous produirons ce même tableau pour notre territoire de référence (mais au seul niveau du Bilan écologique), nous pourrions estimer cette même demande finale en surfaces équivalentes, mais cette fois en ha d'écosystèmes « naturels » (qui couvriront aussi les écosystèmes gérés en surface, mais supposés sans intervention humaines), ou ha de « fertilité biologique », dont nous aurons tiré la productivité moyenne de nos calculs d'Actif.

- Indice d'autonomie territoriale :

C'est ici probablement l'« indice synthétique » le plus fondamental du Passif écologique, que ne pouvait donner l'Empreinte écologique<sup>188</sup>, en ce qu'il représente le taux de couverture « économique » de notre demande finale en exergie par nos seuls écosystèmes gérés. C'est un taux de reproduction « économique » de notre demande finale dû à nos seules capacités territoriales.

---

<sup>188</sup> Pour diverses raisons liées au « cadre de calcul » de l'EE, tel que nous l'avons entrevu dans notre premier chapitre (paragraphe 1.1.5.), dont notamment la non prise en compte de la totalité des surfaces CLC de la France.

Il sera complété pour notre territoire de référence, par le taux de reproduction « écologique », donné par la productivité des écosystèmes « naturels » du territoire.

### 6.6.2 Extrapolations du Passif écologique du Territoire

Du fait de notre méthodologie REAP simplifiée, les tableaux précédents sont par définition tous extensibles au Territoire.

Nous nous passerons de leur présentation, et concentrerons notre attention sur la réalisation d'un bilan thermodynamique du « seul » passif écologique du Territoire (hors bilan écologique).

Des consommations en exergie des matières carbonées (dont hydrocarbures) du passif écologique aligné sur le TES national, et en nous référant aux équations stœchiométriques principales que nous avons développées dans ce travail, nous pouvons en effet déduire « potentiellement » toutes pollutions relatives aux différents secteurs industriels (NAAT) et aux ménages (COICOP) d'une collectivité territoriale d'échelle donnée.

Soit, d'une part, tous les déchets gazeux et émissions entropiques, directs et indirects, relatifs aux consommations d'exergie *oxydée* ( $\text{CH}_2\text{O} + \text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} + \text{énergie dissipée}$ ), ainsi que (potentiellement toujours) toutes autres émissions de GES, répertoriées selon un format de données standardisé comme la nomenclature CCNUCC du GIEC (les répertoires du Citepa nous donnent au moins 5 gaz à effet de serre).

Et d'autre part tous les déchets liquides et solides, directs et indirects, comme autant de rejets relatifs aux consommations, directes et indirectes, des matières organiques et minérales *réduites*, et/ou ayant connue une fermentation anaérobie (émissions de  $\text{CH}_4$ ,  $\text{N}_2\text{O}$ , etc., des décharges).

La question étant, ce qui est plus délicat, d'établir un ratio global des parts oxydée et réduite des consommations redox globales.

Nous avons établi dans nos calculs stœchiométriques un tel ratio, mais de manière expérimentale, sous toutes réserves de travaux approfondis ultérieurs.

De la même manière, pour des raisons compréhensibles de capacité de calcul (personnelles autant qu'informatiques), nous avons restreint notre stœchiométrie aux grands échanges gazeux dus à l'oxydation et à la méthanisation de la biomasse et des hydrocarbures.

Ce qui nous donne, pour le Territoire, un bilan thermodynamique spécifique (hors bilan écologique), que nous avons divisé en deux parties :

A - Bilan fonctionnel des exutoires de l'exergie consommée par le Territoire. Il nous donnera des indications quant au rendement général de la production économique, que nous utiliserons dans la version A, fonctionnelle, du bilan écologique

B - Reconstitution de la « stœchiométrie urbaine », de nature inversée par rapport à la stœchiométrie du territoire naturel telle que nous l'avons reconstituée pour l'actif écologique. Ces deux stœchiométries comparées nous mèneront à la version B, stœchiométrique, du bilan écologique.

Tableau 60 (figure 112) : Bilan (thermodynamique) du Territoire urbain : A - Bilan fonctionnel

Passif écologique 1999 (flux et stocks)		BILAN THERMODYNAMIQUE (fonctionnel & stœchiométrique) DU CYCLE ECONOMIQUE URBAIN D'UN TERRITOIRE														Passif écologique 1999
NAAT14		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	
Territoire de référence Communes du Parc Naturel Régional des Préalpes d'Azur (PNRPA - 06)		Agriculture	Elevage	Pêche, Aquaculture	Sylviculture et transformation du bois	Mise à disposition de l'énergie	Mise à disposition de l'eau	Mise à disposition des matières minérales	IAA et autres transformations de la biomasse agro-pastorale	Autres industries civiles	Bâtiment et travaux publics	Transports industriels et collectifs	Commerces et services marchands	Services récréatifs, socio-culturels et publics	Assainissement, voirie, gestion des déchets	
<b>A - Bilan fonctionnel : Exutoires de l'exergie consommée, en TJ.an-1 (1E+12 joules/an)</b>																
<b>Atmosphère</b>																
<b>1 - Transformation de la biomasse et des hydrocarbures en rejets gazeux (oxydation &amp; méthanisation)</b>																
Biomasse & déchets organiques méthanisés	CH <sub>2</sub> O	2,20	188,76	0,01	0,66	19,62	-	-	0,06	0,13	0,16	2,67	0,21	13,36	50,69	279
Biomasse oxydée	CH <sub>2</sub> O	108	54	-	89	-	6	-	14	824	84	41	5	85	-	27
Hydrocarbures oxydés	CH <sub>2</sub> O	208	76	30	171	3.216	31	23	292	1.342	306	1.009	1.340	1.018	21	9.084
<b>Exergie oxydée/méthanisée</b>	<b>CH<sub>2</sub>O</b>	<b>319</b>	<b>319</b>	<b>26</b>	<b>261</b>	<b>3.229</b>	<b>30</b>	<b>10</b>	<b>1.116</b>	<b>1.426</b>	<b>347</b>	<b>1.017</b>	<b>1.426</b>	<b>1.406</b>	<b>44</b>	<b>10.976</b>
<b>Anthroposphère</b>																
<b>2 - Croissance urbaine (dont stock mobilier et immobilier)</b>																
Croissance urbaine	...	15	47	-1	383	246	56	-236	266	2380	1230	673	3640	2216	18	10.932
<b>Hydrosphère intérieure et maritime</b>																
<b>3- Rejet de déchets liquéfiés (stations d'épuration et autres exutoires liquides)</b>																
Déchets chimio-organiques	CH <sub>2</sub> O, ...	340	54	5	20	10	3	261	1145	474	173	7	55	321	-22	2.845
Toutes eaux (hors déchets)	H <sub>2</sub> O	183	63	7	41	69	509	3	171	260	51	26	234	714	10	2.339
<i>Cubage de l'eau</i>	1000 m3	4.263	1.468	157	958	1.612	11.873	80	3.980	6.058	1.182	604	5.454	16.674	226	54.590
Boues d'épuration	H <sub>2</sub> O, CH <sub>2</sub> O, ...	523	117	12	61	79	511	265	1315	734	223	33	288	1035	-12	5.184
<b>Lithosphère</b>																
<b>4 - Stockage de déchets solides (décharges et autres exutoires de la lithosphère)</b>																
Déchets organiques	CH <sub>2</sub> O	268	66	11	46	5	1	77	1035	93	68	2	38	145	1	1.858
Tous autres déchets solides	...	385	21	57	38	480	27	1153	301	1423	1066	100	694	508	59	6.312
<b>Totaux</b>	<b>TJ</b>	<b>1.510</b>	<b>569</b>	<b>106</b>	<b>790</b>	<b>4.040</b>	<b>626</b>	<b>1.268</b>	<b>4.033</b>	<b>6.056</b>	<b>2.935</b>	<b>1.824</b>	<b>6.086</b>	<b>5.310</b>	<b>110</b>	<b>35.263</b>

## Commentaires :

### Généralités :

Ce tableau est issu, après traitement, des résultats détaillés du Passif écologique du Territoire (tableaux 54 et 55), dont on peut constater que le total est identique.

### Sur l'Exergie comme unité de valeur *biophysique* universelle :

L'exergie « standard » de l'eau distribuée (0,79 KJ/mole, Valero, 2008) nous permet de quantifier directement son cubage (23,34 m<sup>3</sup>/GJ) qui, rapporté à la population du Territoire, nous donne une consommation totale, toutes eaux industrielles comprises, de 545 m<sup>3</sup> par habitant/an.

Et nous pouvons faire de même pour rapporter en masse ou volume une grande majorité des autres postes du bilan (sauf les postes 9 à 14).

L'inverse aurait été complètement impossible. Comment en effet établir un tel tableau de synthèse en masse, volume, ou autres unités élémentaires de matière, comme tente de le faire la MFA (Material Flow Analysis) et notamment le Wuppertal Institute (Haake, 2000 ; Mueller, 2006).

Comment comparer des tonnes ou m<sup>3</sup> d'eau avec des tonnes de machine à laver, des tonnes d'immeuble ou de melons ?

Les modèles d'économie physique et de prospective (MEPP - Valette, 1980 ; Deflandre et autres, 1987 ; Matarasso, 1990) ont permis de résoudre à l'échelle micro économique l'incongruité de l'utilisation simultanée de différentes unités matérielles, notamment quand il s'agit des économies physiques de type rural des PED.

Mais ils posent des problèmes considérables de passage entre la micro et la macroéconomie, et ne sauraient traduire le TES monétaire national en ses équivalents physiques, sans développer de monstrueux tableaux d'équivalence, hors de portée, ne serait-ce que d'une équipe de chercheurs consacrés à cette tâche. Comme par exemple quand il s'agit de traduire en équivalents matière la construction d'un Airbus.

### Sur la « Croissance urbaine » :

Cette ligne du bilan traduit bien à elle seule une immense complexité ramenée à la plus extrême simplicité.

Nous avons informé notre lecteur des choix de simplification que nous avons fait pour notre « méthodologie intégrée » (paragraphes 6.2. et 6.3.).

Comme nous le disions, nous avons privilégiée une image globale, cohérente et significative, mais à faible taux de pixellisation, à une image détaillée impossible à agréger.

Il y a dans cela une certaine similarité avec la mesure linéaire de la côte atlantique, par exemple de Bretagne, selon que l'on choisit une loupe ou une vue d'avion.

Il faut à un moment décider d'une convention.

Dans toutes les dimensions de notre travail, ce fut ainsi un choix continu entre options contradictoires de passage entre le local et le global, et inversement, afin, chaque fois, de trouver le moyen terme, « raisonnable » dans le plus pur sens du terme.

Et si l'économie est à ce jour à ce point traduite en concepts monétaires abstraits, mais pourtant « échangeables » à l'échelle mondiale, c'est parce qu'elle a un jour fait le choix, pour sa part, après les différents constats des limites de la physiocratie, ou encore de l'analyse énergétique, de se passer d'une traduction physique qui avait été diagnostiquée comme impossible ; comme l'avaient si clairement notifié Engels et Marx.

Il nous faut donc nous aussi faire le choix, mais inverse cette fois, de privilégier une représentation biophysique, qui s'avèrera probablement très imparfaite dans ses changements d'échelle (quoique nous ayons déjà pu établir le passage entre le national et le local), à aucune représentation du tout, et à la poursuite de l'économie vers le néant.

Sachant de toutes manières que la méthodologie de production de cette représentation, comme celle des appareils photographiques, restera toujours perfectible.

Pour revenir à notre ligne sur la croissance urbaine, celle-ci est supposée représenter la croissance en « ordre » de la Cité. C'est à dire tout ce qui, de la consommation totale d'exergie de l'économie locale, après les multiples transformations et transferts entre branches, les multiples formes de consommation finale de son « métabolisme », et les multiples formes de déchets, a été traduit en un « stockage » effectif ; c'est à dire une fixation, serait-elle très temporaire au regard des temporalités la Biosphère, d'« entropie négative urbaine ».

Tout comme les BMC (Biotic Matter Cycle) des biogéocénoses, qui en continu réduisent et stockent des masses organiques (CHL), pour d'autant mieux oxyder les autres (GPL), et ainsi amplifier le cycle.

Et tout comme notre propre métabolisme, qui consomme autant d'entropie négative pour rejeter autant d'entropie positive, et fixer à chaque fois le solde, pour notre entretien et notre croissance « biologique ».

C'est dire à quel point ce concept de croissance urbaine contient nombre d'éléments, mobiliers et immobiliers, techno et bio logiques, que, par un choix d'éthique volontaire, nous avons décidés de ne point détailler, pour peu que nous en ayons été capables !

Mais celui qui le voudra comprendra bien le contenu général de cette croissance.

Nous avons déjà dit combien Vernadsky, sur sa fin de vie, s'est laissé embarquer, avec la Noosphère, dans une vision prospective de l'humanité comme partie de l'évolution de la Biosphère, qui probablement l'a rendu fou. Et son expérience nous sert.

Sur le « rendement » et la « directionnalité » urbains :

De ce tableau, entre la consommation totale du passif et la croissance « nette » urbaine, nous pouvons tirer un ratio général de rendement de l'économie locale, soit  $10.932 / 35.963 = 0,31$ .

Ce ratio est le produit de la « directionnalité » de l'Anthroposphère, en ce seul point comparable avec celle de l'Ecosphère qu'elle tend en continu à maximiser le rendement de l'énergie consommée.

Le seul, gros, problème, et la grande différence entre les deux étant que l'Anthroposphère s'arrange toujours pour augmenter le ratio de productivité énergétique d'une activité, en utilisant les produits (et contenus en exergie) d'une autre, qui fera aussi de même, l'ensemble consommant toujours plus d'exergie.

Cette directionnalité de l'économie introduit les comparaisons fonctionnelles entre actif et passif écologiques ; et avec elles un lien tout à fait direct entre la directionnalité de l'Ecosphère et celle de l'Anthroposphère, une relation inversée de productivité

Cet aspect appartenant au bilan écologique, nous le développerons dans les commentaires d'un prochain tableau, la version A, fonctionnelle, du bilan écologique du Territoire.

Tableau 61 (figure 113) : Bilan thermodynamique du Territoire urbain : B - Bilan stœchiométrique

Passif écologique 1999 (flux et stocks)																
BILAN THERMODYNAMIQUE (fonctionnel & stœchiométrique) DU CYCLE ECONOMIQUE ANNUEL D'UN TERRITOIRE URBAIN																
NAAT14	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14		
Territoire de référence Communes du Parc Naturel Régional des Préalpes d'Azur (PNRPA - 06)	Agriculture	Elevage	Pêche, Aquaculture	Sylviculture et transformation du bois	Mise à disposition de l'énergie	Mise à disposition de l'eau	Mise à disposition des matières minérales	IAA et autres transformations de la biomasse agro-pastorale	Autres industries civiles	Bâtiment et travaux publics	Transports industriels et collectifs	Commerces et services marchands	Services récréatifs, socio-culturels et publics	Assainissement, voirie, gestion des déchets	Passif écologique 1999	
<b>B - Bilan stœchiométrique (énergie constante) de l'exergie transformée en rejets atmosphériques, en TJ.an-1 (1E+12 joules/an)</b>																
Entrées de l'atmosphère																
Dissipation d'énergie libre de Gibbs	El	308,73	152,68	25,67	253,86	3.135,34	29,18	9,58	1.085,24	1.391,47	338,78	990,32	1.390,81	1.359,45	0,66	10.472
Emissions de gaz méthane	CH <sub>4</sub>	1,87	160,58	0,01	0,56	16,69	-	-	0,05	0,11	0,14	2,27	0,18	11,36	43,13	237
Emissions de gaz carbonique	CO <sub>2</sub>	10,51	6,52	0,81	8,63	101,74	0,94	0,25	38,86	45,48	11,16	32,14	45,46	45,84	0,26	349
Diffusion de vapeur d'eau	H <sub>2</sub> O	0,33	0,13	0,03	0,27	3,72	0,04	0,02	1,05	1,63	0,39	1,17	1,63	1,50	0,00	12
<b>Σ Entrées</b>	<b>Σ E</b>	<b>321,44</b>	<b>319,92</b>	<b>26,53</b>	<b>263,33</b>	<b>3.257,49</b>	<b>30,16</b>	<b>9,84</b>	<b>1.125,20</b>	<b>1.438,68</b>	<b>350,47</b>	<b>1.025,90</b>	<b>1.438,08</b>	<b>1.418,15</b>	<b>44,05</b>	<b>11.069</b>
Sorties de l'atmosphère et de l'Anthroposphère																
Consommations d'oxygène	O <sub>2</sub>	- 2,70	- 0,81	- 0,24	- 2,22	- 28,42	- 0,27	- 0,10	- 9,10	- 12,56	- 3,04	- 8,98	- 12,55	- 11,96	- 0,11	- 92,82
Transformation de l'eau (méthanisation)	H <sub>2</sub> O	- 0,000670	- 0,057502	- 0,000005	- 0,000202	- 0,005978	-	-	- 0,000018	- 0,000040	- 0,000049	- 0,000813	- 0,000065	- 0,004069	- 0,015443	- 0,08
Méthanisation biomasse & déchets organiques	CH <sub>2</sub> O	- 2,20	- 188,76	- 0,01	- 0,66	- 19,62	-	-	- 0,06	- 0,13	- 0,16	- 2,67	- 0,21	- 13,36	- 50,69	- 279
Oxydation biomasse	CH <sub>2</sub> O	- 108,05	- 54,10	4,12	- 89,34	6,20	1,26	13,53	- 824,10	- 84,20	- 40,90	- 5,29	- 85,14	- 375,14	27,34	- 1.614
Oxydation hydrocarbures	CH <sub>2</sub> O	- 208,49	- 76,19	30,40	- 171,11	- 3.215,64	- 31,15	- 23,27	- 291,95	- 1.341,79	- 306,37	- 1.008,97	- 1.340,18	- 1.017,68	- 20,78	- 9.084
Total oxydation et méthanisation	CH <sub>2</sub> O	- 318,74	- 319,05	26,29	- 261,11	- 3.229,06	- 29,89	- 9,74	- 1.116,10	- 1.426,13	- 347,43	- 1.016,92	- 1.425,54	- 1.406,18	- 44,14	- 10.976
<b>Σ Sorties</b>	<b>Σ S</b>	<b>- 321,44</b>	<b>- 319,92</b>	<b>26,53</b>	<b>- 263,33</b>	<b>- 3.257,49</b>	<b>- 30,16</b>	<b>- 9,84</b>	<b>- 1.125,20</b>	<b>- 1.438,68</b>	<b>- 350,47</b>	<b>- 1.025,90</b>	<b>- 1.438,08</b>	<b>- 1.418,15</b>	<b>- 44,05</b>	<b>- 11.069</b>
Conservation de l'énergie	Σ E/S	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Ce tableau a vocation à vérifier la conservation de l'énergie en territoire urbain. Nous ne ferons pas de commentaires de ce tableau, qui nous servira directement à la réalisation du Bilan écologique, dans sa forme stœchiométrique.

Notons simplement que le bilan stœchiométrique concerne essentiellement le total de la biomasse et des hydrocarbures oxydés et méthanisés du tableau précédent, qui suppose sa contrepartie de consommation d'oxygène ainsi que d'eau pour la méthanisation.

## **.Chapitre VII.**

### **Bilan écologique**

*Le chapitre VII a pour objectif de développer et mettre en œuvre les principes méthodologiques de réalisation du Bilan écologique du territoire, en deux versions distinctes, **A**, fonctionnelle, et **B**, stœchiométrique, aux objectifs différents.*

*La section 7.1 expose quelques compléments méthodologiques utiles à la réalisation de la version **A**, fonctionnelle du bilan, puis les met en œuvre. De cette version du Bilan écologique du Territoire seront notamment tirés et commentés deux indices fondamentaux, l'indice d'autonomie territoriale et l'indice d'écodéveloppement.*

*La section 7.2 formule en introduction le postulat (de l'Anthropocène) à l'origine de la réalisation de la version **B**, stœchiométrique, du bilan écologique, puis expose des compléments méthodologique avant de le mettre en œuvre et de le commenter.*

Nous arrivons enfin au bilan écologique (Be), dont nous ne développerons les résultats que pour notre territoire de référence, le seul dont nous avons calculé l'actif.

La version A sera *fonctionnelle*, et simplifiée. Comme il en était du tableau 59 et des autres extrapolations du seul passif de la France, c'est une version *technique* directement utile à l'analyse et à la décision au sein des collectivités impliquées.

Ceci quand la version B, *stœchiométrique*, au caractère strictement prospectif, aura plutôt un caractère utile à la recherche et au développement, scientifiques et/ou écologiques.

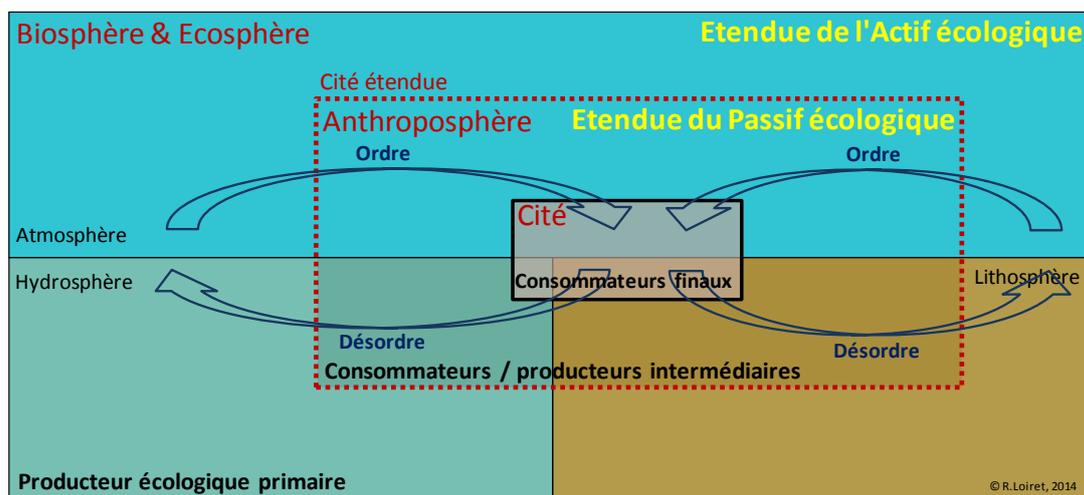
## 7.1 Version A, fonctionnelle et simplifiée

### 7.1.1 Compléments méthodologiques

#### 7.1.1.1 Recouvrement de l'Actif et du Passif écologiques

Reprenons, sous une forme légèrement modifiée, notre schéma d'introduction concernant l'assise conceptuelle et le cadre opérationnel de mesure du Be.

Figure 114 : Cadre opérationnel de mesure du Bilan *écologique*



Ce schéma ne permet pas de le préciser, mais l'étendue de l'Actif écologique n'est pas strictement limitée à l'extérieur du cadre en pointillés rouges. Pour toute la zone de l'Anthroposphère, interface entre les écosystèmes naturels et la cité, il y a recouvrement partiel entre actif et passif.

L'Anthroposphère est en effet une zone de transfert et de transformation, entre les biens et services provenant des écosystèmes et territoires naturels, et leur transformation à destination de la consommation finale des ménages.

Ainsi, les écosystèmes gérés, comme l'agriculture et la sylviculture, sont parties de l'Anthroposphère, où les activités humaines impactent directement sur l'Ecosphère, mais selon des intensités variables, allant de l'agriculture vivrière (et biologique) et la pêche artisanale, à l'agriculture et aux pêcheries purement industrielles, jusqu'aux Industries Agricoles et Alimentaires (IAA).

Tout comme les industries minières, qui impactent elles aussi directement sur l'Ecosphère, et dont les transformations se prolongent jusque dans les zones industrielles en bordure de la cité.

Or, tout ce que les écosystèmes gérés de l'Anthroposphère produisent en termes de flux annuels fut intégré par défaut dans le calcul d'actif du Territoire, en même temps que la production des écosystèmes naturels. Ceci quand, nous fondant les flux annuels de carbone (NPP, tableau 33), nous les avons alloués aux différents stocks de carbone, eux-mêmes répertoriés selon la nomenclature CLC (tableau 31).

Et celle-ci intègre par défaut, en sus de tous les écosystèmes naturels, tous les écosystèmes gérés, plus ou moins artificiels, y compris les jardins et espaces verts urbains, les serres horticoles, etc.

Tout ce que les activités de l'Anthroposphère consomment fut par ailleurs intégré dans le calcul du passif, à partir des comptes économiques, qui par défaut intègrent toutes les formes de consommation, depuis les matières brutes naturelles aux matières transformées les plus élaborées.

Ainsi, le bilan du Territoire intégrera par défaut toutes les formes de production, de la plus écologique à la plus industrielle, par simple différence entre production et consommation d'exergie.

Sachant que, s'il arrive que nous ayons un jour les moyens de réaliser des comptes plus détaillés, un simple zoom sur le bilan actif/passif d'une activité donnée de cette zone d'interface nous permettra de mettre en exergue sa *productivité énergétique nette* spécifique.

Ce qui nous ramène à la productivité énergétique telle que la concevait Podolinsky, dont nous avons synthétisées les évolutions dans nos tableaux 1 et 2, et où l'agriculture biologique apparaissait comme un intermédiaire entre les productivités énergétiques nettes des XIXe et XXe siècle.

Sauf à intégrer cette fois la nouvelle nature de la Nature, avec ce qu'elle contient (stocks) et produit (flux), et derrière elle, toute la chaîne entropique qui suit.

#### **7.1.1.2 Cadre structurel de calcul du Bilan fonctionnel**

La stœchiométrie territoriale et le calcul de l'actif écologique (tableaux 34 et 35) n'ont pas été développés selon des contraintes structurelle similaires à celles du passif (tableaux 54-55 et 60-61), dont le calcul fut élaboré séparément plus d'une année après.

Nous n'avons donc pu développer dans le bilan une structure de l'actif selon la NAAT directement opposable à celle du passif, et ainsi présenter une « tension de surface biologique » développée en plusieurs postes, comme on a découvert une « tension de surface économique » à 14 postes dans le tableau 59.

Par ailleurs, si l'allocation des surfaces CLC à la NAAT s'avère efficace en matière de tension de surface économique, elle revêt encore à ce stade un caractère artificiel quand il s'agit de la productivité des écosystèmes naturels, qui demanderaient une nomenclature d'interface mieux adaptée.

La chose est parfaitement faisable, en se fondant sur la classification EUNIS - Habitat (European University Information Systems), nomenclature européenne des habitats écosystémiques, qui comprend plus de 5.000 postes détaillés et une centaine de postes de synthèse.

Cette nomenclature a en effet l'avantage unique de regrouper dans un même ensemble, comme le fait CLC, mais avec des détails bien plus précis, tant les habitats des écosystèmes



7.1.2 Résultat : Bilan *écologique* du Territoire (version A)Tableau 63 (figure 116) : *Bilan écologique* du Territoire (version A fonctionnelle)

Bilan <i>écologique</i> (Version A : Fonctionnelle) Territoire : Communes du PNRPA, 1999	NAAT14	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	Population du Territoire : 100.164 habitants		
	Formules	Agriculture	Elevage	Pêche, Aquaculture	Sylviculture et transformation du bois	Mise à disposition de l'énergie	Mise à disposition de l'eau	Mise à disposition des matières minérales	IAA et autres transformations de la biomasse agro-pastorale	Autres industries civiles	Bâtiment et travaux publics	Transports industriels et collectifs	Commerces et services marchands	Services récréatifs, socio-culturels et publics	Assainis-sement, voirie, gestion des déchets	Totaux	Moyennes et ratios	
Surfaces du territoire (CLC 2000 rapporté à la NAAT14)	(1)	6.702	19.784	-	63.849	-	120	47	498	55	-	-	4.651	8.243	-	103.949 Ha	1,038 Ha/habitant	
<b>Production intermédiaire</b> (Prod. intérieure hors imports du TES14 exergie)	(2)	929	287	60	449	2.377	335	713	2.012	3.450	1.231	1.077	2.847	2.211	59	18.037 TJ	0,180 TJ/habitant	
Surfaces théoriques du territoire réquisitionnées par la production intermédiaire	(3)	4.583	1.716	11	26.270	374	114	104	22.949	8.960	4.369	873	20.432	13.098	98	103.949 Ha	1,038 Ha/habitant	
Tension de surface économique	(4) = (2)/(3)	0,203	0,167	5,679	0,017	6,362	2,945	6,860	0,088	0,385	0,282	1,233	0,139	0,169	0,602	-	0,174 TJ/Ha [2]	
Productivité exergetique moyenne théorique des écosystèmes industriels	(5) = →	X	X	X	X		X	X	→ (5) = $\Sigma(1\grave{a}4 \ \& \ 6\grave{a}7)$ de (2) / $\Sigma(1\grave{a}4 \ \& \ 6\grave{a}7)$ de (3)								-	0,085 TJ/Ha [2]
<b>Passif écologique</b> (Prod. intermédiaire + imports - exports du TES14)	(6)	1.804	440	53	853	9.747	2.339	213	2.896	5.279	2.471	1.123	3.950	4.038	58	35.263 TJ	0,339 TJ/Ha [2]	
<b>Dse</b> = Demande finale en surfaces économiques	(7) = (6)/(4)	8.900	2.626	9	49.866	1.532	794	31	33.033	13.708	8.771	910	28.350	23.918	97	172.547 eHa [3]	1,723 eha/habitant	
<b>Dseg</b> [1] = Demande finale en surfaces équivalentes d'écosystèmes gérés	(8) = (6)/moy(5)	21.341	5.201	624	10.085	115.288	27.665	2.514	34.258	62.441	29.234	13.280	46.728	47.759	689	417.108 egHa [4]	4,164 egha/habitant	
Demande finale en hectares globaux (gha)	Calcul antérieur [6]	Note : Les gha sont des hectares écosystémiques industriels de productivité moyenne										<b>Empreinte écologique</b> 1999 (standard GFN), pour mémoire				501.491 gHa	5,007 gha/habitant	
Taux de couverture du Passif écologique par les écosystèmes gérés	(9) = (1) / (8)															<b>Indice d'autonomie territoriale</b>		0,249
<b>Actif écologique</b> (production d'exergie utile des écosystèmes naturels)	(10)															11.402 TJ,m	0,110 TJ,m/ha	
<b>Dsb</b> = Demande finale en surfaces biologiques équivalentes	(11) = (6)/moy(10)															321.494 bioHa [5]	3,210 bioha/habitant	
<b>Taux de couverture du Passif écologique</b> par l' <b>Actif écologique</b>	(12) = →	→ (12) = (1) / (11) = (10) / (6)														<b>Indice d'écodéveloppement</b>		0,323
[1] Ou <b>Passif écologique</b> en surfaces écosystémiques de production industrielle	[2] TJ/Ha ou 100MJ/m2 ou 100MN/m	[3] eHa = Ha économiques (selon tension de surface)	[4] egHa = Ha équivalents d'écosystèmes gérés	[5] bioHa = Ha équivalents d'écosystèmes naturels	[6] Loiret(2011c)													

**Premiers commentaires :**

Ayant déjà commentés les différents concepts de ce tableau pour le passif de la France (commentaires du tableau 59), nous ne commenterons ici que les nouveaux, essentiellement relatifs à la comparaison actif/passif.

Sur la structure comparée de l'actif et du passif :

Comme nous l'avons déjà dit, la stœchiométrie territoriale et le calcul de l'actif écologique n'ont pas été développés selon des contraintes structurelle similaires à celles du passif, dont le calcul fut élaboré plus d'une année après.

Nous n'avons donc pu développer dans ce tableau une structure de l'actif selon la NAAT directement opposable à celle du passif, et ainsi présenter une « tension de surface biologique » développée selon la NAAT, comme l'est celle de la « tension de surface économique ».

Sur divers sous-ratios de comparaison actif/passif :

Nous pouvons tirer du tableau de bilan divers sous ratios de dépendance/indépendance de type économique.

Par exemple, la demande en surfaces agricoles, qui est de 21.341 ha contre 6.702 ha à priori disponibles (surfaces CLC).

Et si jamais nous pensions que les IAA pouvaient compenser ce déficit, nous nous trompons, car leur demande spécifique en surfaces « réquisitionnées » (à leur seule disposition) est de 34.258 ha, contre 498 ha à priori disponibles.

Et tout à l'avenant, en recommandant cependant une attitude de réserve consistant à manier ces données inhabituelles (et de nature expérimentale) avec une infinité de précautions.

Quand au ratio principal, l'indice d'écodéveloppement, il fera l'objet d'un paragraphe spécifique.

Auquel nous joindrons un paragraphe complémentaire ayant vocation à préciser et comparer les notions d'utilité, au sens écologique et économique.

**7.1.2.1 Sur le concept et l'indice d'écodéveloppement**

Il aurait été complètement futile, dans cette version fonctionnelle du bilan, d'opposer toutes les productions de l'actif à toutes les consommations du passif écologiques, pour établir un simple solde entre les deux.

Ceci sera valable quant aux impacts stœchiométriques de l'économie sur l'Ecosphère (version B du bilan), mais pas du point de vue des concepts d'utilité de l'exergie, vus tant du côté de l'Ecosphère que de l'Anthroposphère.

Depuis la simple économie de cueillette, la société a un peu évolué, et entre l'Ecosphère qui produit originellement et la Cité qui consomme finalement, toute la technologie de l'Anthroposphère intervient aujourd'hui pour transformer les ressources naturelles en produits « digestibles », à haute valeur énergétique ajoutée, par les consommateurs.

Ce qui se traduit par une « directionnalité » de l'économie, dont Engels, déjà, avait soulignée le caractère entropique.

Et tout aussi entropique que la directionnalité de l'Ecosphère, sauf que cette dernière recycle en continue l'entropie produite.

Précédemment définie par l'augmentation continue du taux de productivité demandé à l'exergie matérielle par l'économie, nous pouvons qualifier cette directionnalité économique par l'exergie totale que l'Anthroposphère dépense pour augmenter la productivité « en l'état » de l'exergie des ressources naturelles, jusqu'à ce qu'elle atteigne le besoin d'exergie « en l'état » de la demande finale.

C'était le résultat presque essentiel du tableau 60, que nous avons déjà donné, c'est à dire la différence entre la consommation totale du passif écologique et la croissance « urbaine » nette du Territoire. Pour produire 10.932 TJ de croissance effective, l'économie locale aura dépensé au total 35.963 TJ, la différence entre les deux, soit 69 %, étant constituée de déchets, ou d'entropie.

Cette directionnalité nous dit que si nous faisons de telle manière qu'il pousse dans l'Ecosphère, sans aucune intervention d'énergie extérieure, des plats tout préparés, des TEP et des diamants à la place des fleurs, nous ferions de considérables économies d'exergie.

Elle est comparable à la directionnalité de l'Ecosphère, sauf à être négative, ou inversée, ou compensatoire.

En effet, plus la directionnalité de l'Ecosphère, traduite par la  $D_{ES}$  et la  $D_{ET}$  de l'exergie territoriale (cf. tableau 35), sera importante, et avec elle le rendement en exergie « utile », moins l'Anthroposphère aura besoin de dépenser d'exergie pour l'augmenter, au regard de ses besoins.

Ce qui est partout valable, depuis l'agriculture, qui consomme de l'exergie pour augmenter celle qu'elle produit, jusqu'aux process de production de n'importe quelle usine.

Et inversement, plus l'exergie utile des ressources sera faible, au regard des masses consommées, plus les process auront besoin d'exergie pour intensifier leur rendement.

**Il existe ainsi un lien direct entre la directionnalité de l'Ecosphère et celle de l'Anthroposphère.**

Et le grand paradoxe est que nous avons « tout » fait pour diminuer le rendement en exergie « nette » de l'Ecosphère, qu'elle soit sous ou sans contrôle.

Comme en témoignent nos tableaux 1 à 3, sur la productivité énergétique.

A commencer par la destruction de la biodiversité, et de ses territoires porteurs, qui de toujours a été le point clef de la directionnalité et de la productivité énergétique de l'Ecosphère.

La traduction concrète du lien existant entre les directionnalités (et productivités) de l'Ecosphère et de l'Anthroposphère est « capitale ».

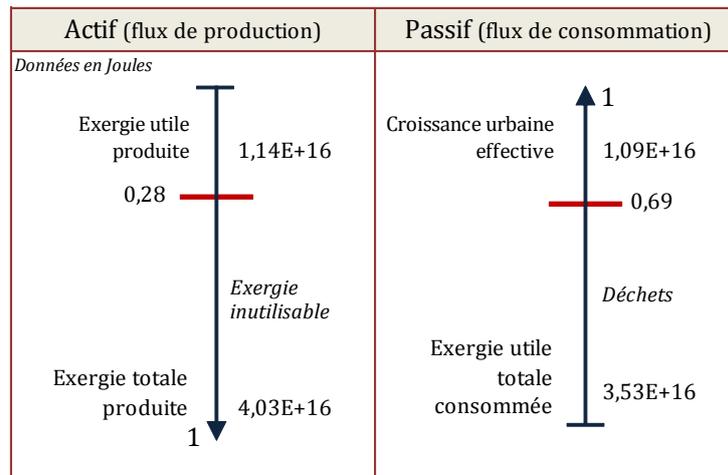
Tentons de le faire avec la plus grande simplicité, même si la réalité demande des interprétations beaucoup plus complexes.

Prenons pour ce faire les données provenant :

- Pour l'actif, du total des variations de stock (flux annuels) du tableau 35 (Actif écologique du Territoire), exergie standard et exergie utile (ou  $D_{ET}$ ),
- Pour le passif, des totaux passif écologique et croissance urbaine du tableau 60 (Bilan fonctionnel du Passif écologique du Territoire).

Et établissons le schéma suivant :

Figure 117 : Comparaison des directionalités de l'actif et du passif écologiques



Imaginons maintenant qu'il y ait une relation directe de cause à effet, ce qui serait logique, entre le niveau d'exergie utile de l'actif, et le niveau de déchets du passif.

D'une forme très simple, du genre : Taux de déchets passif = 1 - taux d'exergie utile actif x coefficient constaté (taux de croissance urbaine/taux d'exergie utile produite).

Le taux actuel de couverture, par l'exergie utile de l'actif, de l'exergie utile totale (directe et indirecte) consommée par le passif est de 32 % (1,14/3,53).

Supposons que nous trouvions les moyens de faire passer le taux de rendement d'exergie utile de l'actif de 0,28 à 0,50 (par exemple commencer à faire pousser des plats tous préparés à la place des fleurs !).

Notons bien qu'il ne s'agit pas ici d'augmenter la productivité totale de l'Ecosphère, mais son taux d'exergie « utile », soit sa  $D_{ET}$ . Ce qui est un concept qui n'a rien à voir avec l'intensification énergétique des écosystèmes gérés, dont la productivité énergétique nette est quasi nulle (tableaux 1 à 3).

Un petite règle de trois améliorée nous donne une production d'exergie utile qui passerait à 2,01E+16 J, et une demande totale d'exergie consommée par le passif de 1,99 E+16 J, ceci pour satisfaire une même demande de croissance urbaine de 1,09 E+16 J.

Soit un taux de couverture du passif par l'exergie utile de l'actif qui passerait à plus de 100%.

Nous nommerons *Ecodéveloppement* l'ensemble des activités susceptibles d'augmenter le taux de rendement en exergie utile de l'actif, ainsi que toutes autres activités susceptibles d'augmenter son taux de couverture du passif (faire baisser le taux de déchets, augmenter leur taux de recyclage, diminuer la demande de croissance urbaine, ...).

Et nous nommerons *Indice d'écodéveloppement* (IDé) le taux de couverture du passif par l'exergie utile de l'actif.

Pris comme tel, à l'échelle locale, un IDé haut pourrait être un indice d'*autarcie*, qui pourrait faire l'objet de « très nombreux » commentaires, dans un cadre économique où les échanges locaux, nationaux et internationaux sont devenus le standard obligé de la consommation courante.

Il est bien entendu qu'il n'existe pas d'économie sans échanges, ne serait-ce que de savoir-faire ; sinon, pourra-t-on dire, autant retourner à l'âge de pierre !

Pourtant, entre l'échelle locale et l'échelle nationale, l'indice prendra de plus en plus de sens quant aux capacités (ou possibilités) « raisonnables » d'une population donnée, d'un territoire donné, dans le contexte actuel, à assurer par elle-même les bases essentielles de sa reproduction économique ; plus l'indice est bas, plus il traduit une *dépendance*. Nous pourrions en ce moment précis (été 2015) penser à la Grèce, et il est certainement, s'il nous arrive un jour de pouvoir le calculer pour les différentes nations, des seuils nationaux de l'indice en deçà desquels nous pourrions constater l'apparition de graves déséquilibres.

Et au delà, de l'échelle nationale à l'échelle internationale et mondiale, comme il en est de l'Empreinte écologique, mais de manière plus « écologique »<sup>190</sup>, l'indice prendra un caractère certain d'*alerte* sur les limites globales de la consommation face aux entières capacités de la Biosphère et de l'Ecosphère à seulement permettre la reproduction du vivant.

Mais en réalité, cette comparaison actif-passif a plusieurs autres facettes, selon que le dénominateur est l'actif ou le passif, et selon que le ratio est inférieur ou supérieur à 1.

- *En l'état, supérieur à 1* : L'indice devient dans ce cas un indice « d'accumulation énergétique nette » (de toutes ponctions entropiques), exactement tel que le concevait Podolinsky, mais en intégrant cette fois la nouvelle nature, tant de la Nature que de l'économie.

- *Inversé, supérieur à 1* : Si nous inversons l'indice en l'état (1/0,323), le ratio obtenu : 3,093 est devenu un indice de « surdéveloppement », qui nous montre à quel point les consommations économiques « toutes confondues » du Territoire, dépassent les capacités écosystémiques brutes « toutes confondues » de ses écosystèmes naturels et gérés. Mais ici encore avec des seuils « raisonnables », entre la dépendance totale et l'autarcie complète, que seul l'usage et les évolutions comparées de l'économie et de la crise environnementale nous permettront de constater.

- *Inversé, inférieur à 1* : Nous pourrions dire que dans ce cas l'indice prend un sens un peu différent de l'accumulation énergétique nette. Ce serait plutôt l'indice d'une économie qui est dans des relations parfaitement supportables avec son environnement, toutes appréciations concernant l'IDH (Indice de Développement Humain) mises à part !

Ces facettes de la comparaison actif-passif étant ce qu'elles sont, notons maintenant que le Territoire est un *parc naturel*, avec une surface d'environ « 1 ha » par habitant.

Et qu'en 2000, la surface disponible de 0,933 ha par habitant de la France (tableau 59) était très proche de celle du Territoire, ce qui aurait tendance à faire de celui-ci un « modèle réduit » de la situation française, dont l'indice d'écodéveloppement pourrait être similaire.

Avec un IDé de 0,32 pour le Territoire, et relativement similaire pour un pays, la France, particulièrement riche en espaces naturels et écosystèmes gérés, ceci nous laisse maintenant facilement imaginer le niveau de *dépendance* des collectivités, nationales et internationales, strictement urbaines, ne possédant pas de tels écosystèmes associés.

---

<sup>190</sup> Puisque l'indice est maintenant supposé rendre compte de la biodiversité, et prendre en compte toutes les capacités de la Biosphère et de l'Ecosphère à produire l'exergie biogéochimique et géochimique biogène essentielles à notre reproduction, ce que ne fait pas l'Empreinte écologique.

Ceci dit, quelques précisions s'imposent sur la notion d'utilité de l'exergie produite par l'Ecosphère, qui trouve de nombreuses résonances avec la notion d'utilité de l'Anthroposphère.

### 7.1.2.2 Sur l'exergie utile, inutilisable ou inutile, produite et consommée

#### Exergie utile produite dans l'Ecosphère

L'exergie utile produite par les écosystèmes naturels nous est donnée, dans nos propositions, par leur distance à l'équilibre thermodynamique ( $D_{ET}$ ), d'oxydation et de réduction, mesurée en Joule.mètre ( $J.m$ ).

Et nous avons déjà vus dans nos conclusions du chapitre III, quelques éléments relatifs à la signification *écosystémique* (paragraphe 3.5.2.) et *économique* du Joule.mètre (paragraphe 3.5.3.).

Des recherches ultérieures seront absolument nécessaires pour mieux caractériser ces significations, à l'aune de résultats comparés suffisamment nombreux.

Et les résultats de notre étude de cas concernant l'écosystème de Mondego (paragraphe 3.4.2.) sont déjà là pour nous donner quelques pistes de recherche.

Mais nous donnerons en attendant quelques précisions permettant de mieux cerner cette signification dans le cadre actuel de la comparaison actif/passif.

Cette notion d'exergie utile produite est relative au niveau de structuration de l'exergie, par de l'information, et à sa distance à l'équilibre statistique ( $D_{ES}$ ), que ce soit de réduction ou d'oxydation.

L'exergie stockée dans l'Ecosphère se trouve dans de multiples états, de la vase d'une mare putride au bois d'ébène, en passant par les algues vertes, la tourbe, l'herbe des champs, les pommes pourries tombées de l'arbre et divers autre corps en fermentation, aérobie ou anaérobie, qui participeront plus ou moins dans le temps à la productivité du BMC.

Et quand les flux annuels de l'Ecosphère viennent renouveler la végétation, ils participent tous en proportion aux multiples états de l'exergie stockée.

La nature s'est toujours satisfaite sans questions de ces divers états, et cette utilité/structure ne s'est probablement caractérisée comme telle qu'avec l'apparition des animaux, de plus en plus évolués, dont l'intensité respiratoire et la productivité énergétique interne n'a cessée d'augmenter au cours de l'évolution (cf. figure 58).

Ce qui a supposé de leur part un choix sélectif de nourritures de plus en plus riches en exergie structurée, et équilibrée selon dans ses contenus respectifs en CHL et GPL.

Jusqu'à l'homme, qui, s'il est bien vrai qu'il aurait commencé par manger des pommes, les aura sans nul doute lui aussi choisies plus riches en sucres et vitamines, et surtout pas pourries.

Il y a donc ici une utilité/structure (de l'exergie) des produits de l'Ecosphère qui, originellement, fut directement liée à l'utilité/structure (de l'exergie) consommée par l'Anthroposphère.

Et c'est ce niveau d'utilité de l'exergie qu'est supposé nous donner la  $D_{ET}$  et l'exergie en  $J.m$  d'un territoire naturel.

Elle ne saurait certes pas nous dire où se trouve exactement la limite entre la vase et le lotus qui enfonce dedans ses racines, mais nous donne un niveau général d'utilité

structure qui apparaîtrait comme vraiment comparable avec l'utilité demandée par l'Anthroposphère dans les premières entrées de sa consommation.

### Exergie « inutilisable », produite dans l'Ecosphère

Nous avons longuement commentée la mystérieuse formule (38) :  $pV = G_B + TS$ , que nous avons proposée comme fonction d'état des écosystèmes, et qui était particulièrement illustrée par notre tableau 7 sur la stœchiométrie du glucose.

Si nous reconsidérons maintenant le tableau 35 de l'actif écologique, nous avons une exergie pV totale standard de  $4,03E+16$  J, et une exergie pV.m utile de  $1,14E+16$  J.

Ce qui devrait nous laisser supposer que la différence,  $2,89E+16$  J, est de l'exergie « inutile ».

Or nous l'avons qualifiée d'« inutilisable » dans la figure 117, ce qui supposait pour nous qu'elle apparaissait inutile pour l'Anthroposphère, mais parfaitement utile pour l'Ecosphère.

En fait, elle correspondrait à une « entropie biologique », mais de nature considérablement différente de l'entropie produite par notre consommation.

C'est à dire une exergie totalement déstructurée certes, comme nous la trouvons dans nos décharges, mais d'autant mis à profit par les cycles biotiques des biogéocénoses que sa déstructuration est accomplie.

Ainsi en est-il des matières organiques dans un état de décomposition avancée, et de l'humus du sol. Le ver de terre, quand il est là, s'est nourri, à la différence de bien des animaux, des ultimes parties digestes de cette exergie décomposée, en même temps que de l'argile des couches profondes, et il en a sorti son propre déchet, un mélange quasi indissociable d'argile et d'humus.

Il formera dans le sol ce que l'on nomme *couche argilo-humique*, aux propriétés particulières qui en font pour les plantes la nourriture la plus équilibrée qui soit, « fondatrice » de la fertilité biologique.

C'est dire son « utilité » pour l'ensemble de l'Ecosphère, et pour tous ceux qui s'en nourrissent.

Et combien l'entropie, biologique, pour la Nature, représente une qualité essentielle de ses cycles biogéochimiques, grâce à laquelle ils intensifieront leur directionnalité et leur production d'exergie biogéochimique.

Au final, il nous serait possible d'appliquer la formule (38) à la génération de pV dans l'Ecosphère, où  $G_B$  correspondrait à l'exergie utile, à forte distance à l'équilibre thermodynamique, et  $TS$  à l'entropie biologique, vue comme une exergie entièrement déstructurée.

Sauf à reprendre les termes de la formule pour remplacer  $G$  (l'énergie libre) par l'exergie « néguentropique », et trouver un signe particulier, mais significatif, pour l'exergie, certes « entropique », mais à l'utilité biologique essentielle.

Ce qui sera pour une prochaine fois, mais nous montre en attendant combien la question des déchets « inutiles », à  $D_{ET}$  nulle, produits par l'Ecosphère, et tels que nous les trouvons dans les décharges, pourrait bouleverser la donne du bilan fonctionnel, comme nous l'avons étudié à partir de la figure 117.

### Exergie utile consommée dans l'Anthroposphère

Sauf exceptions infimes (Le Caire, Bombay, ...), les entreprises n'enfoncent pas leurs racines dans les décharges, quand bien même celles-ci ont une « tension de surface » (une exergie au m<sup>2</sup>) environ 400 fois plus élevée que la tension de surface économique moyenne, et près de 1000 fois plus élevée que celle de l'agriculture (tableau 59).

Il faudrait donc croire que cette exergie ne leur semble pas utile, sans que pourtant elles sachent nous dire exactement pourquoi, en dehors des seuls critères de rentabilité.

Si elles nous posaient la question, nous leur répondrions que la  $D_{ET}$  des décharges est quasiment nulle, compte tenu du taux de déstructuration des déchets, ou niveau d'entropie. Ici donc, l'utilité serait strictement corrélée à la  $D_{ET}$ .

Et ailleurs ?

On a jamais vu une entreprise chercher ses ressources naturelles en dehors de gisements constatés, par l'expérience ou la recherche. Une entreprise de production de bois d'œuvre ne coupe pas l'herbe de la forêt, une autre de production de diamants ne va pas fouiller au hasard dans les dunes des plages de l'Atlantique.

Cela veut notamment dire que, quand nous parlons dans la figure 117 de l'exergie utile totale consommée par le passif, les volumes minéraux globaux de contenance du gisement, d'Uranium par exemple, ont par défaut acquis, dès leur identification comme gisement, un niveau d'utilité plus important que les sables du désert d'à côté.

Et volume globaux que l'entreprise va, dans la plupart des cas, retourner et déstructurer, au sens naturel du terme, pour les rendre à la fois inutiles à l'Ecosphère et l'Anthroposphère, sauf à leur donner parfois une structure de type urbain (talus des décharges par exemple), qui est, comme les décharges elles-mêmes, de toutes façons nulle au plan de la distance à l'équilibre statistique (de la diversité structurale), tout comme les HLM des années 70.

Ainsi, l'économie prend en compte l'utilité de l'exergie à un niveau situé quelque part en deçà de l'utilité de l'exergie de l'Ecosphère.

Et s'il y a des déchets tout au long des process de l'Anthroposphère, déchets et produits de consommation sont ensemble le produit de gisements considérés comme utiles avant même de commencer à exploiter et filtrer le gisement.

La notion d'utilité économique est dans ce sens relativement différente de l'utilité écologique ; et seules des recherches plus détaillées et approfondies nous permettraient, peut-être, un jour, de préciser cette différence.

Dans tous les cas, cela explique que nous considérons la totalité de l'exergie entrant dans le process comme économiquement utile, quand bien même nous ne prenons en compte de l'utilité de l'actif écologique que sa  $D_{ET}$ .

Et qu'au final, nous opposions cette seule  $D_{ET}$  au passif écologique pour qualifier l'indice d'écodéveloppement.

Ceci donne les raisons pour lesquelles nous avons divisé notre  $Be$  final en deux parties, un bilan fonctionnel (version A), qui représente l'utilité de l'actif au regard des besoins d'utilité de l'économie, et un bilan thermodynamique (version B, stœchiométrique), qui regardera les impacts du passif au nom des intérêts purement écologiques.

## 7.2 Version B, stœchiométrique (et thermodynamique)

### 7.2.1 Le postulat d'un bilan stœchiométrique de l'Anthropocène

Nous voici arrivés à la partie peut-être la plus significative de notre travail quant à l'intérêt du Be du point de vue de l'*écologie globale*.

Cette version B a un caractère strictement prospectif, et nous n'aborderons que les principes méthodologiques de base d'une première application expérimentale à l'échelle, locale, de notre territoire de référence.

Elle ne saurait en effet être vérifiée avant que nous puissions étendre ses calculs à une échelle *significative*. Ce qui ne saurait être l'objet du présent travail.

Elle est partie d'un postulat sur l'Anthropocène, qui se réfère explicitement aux *généralisations empiriques* de Vernadsky, que nous formulerons en deux parties :

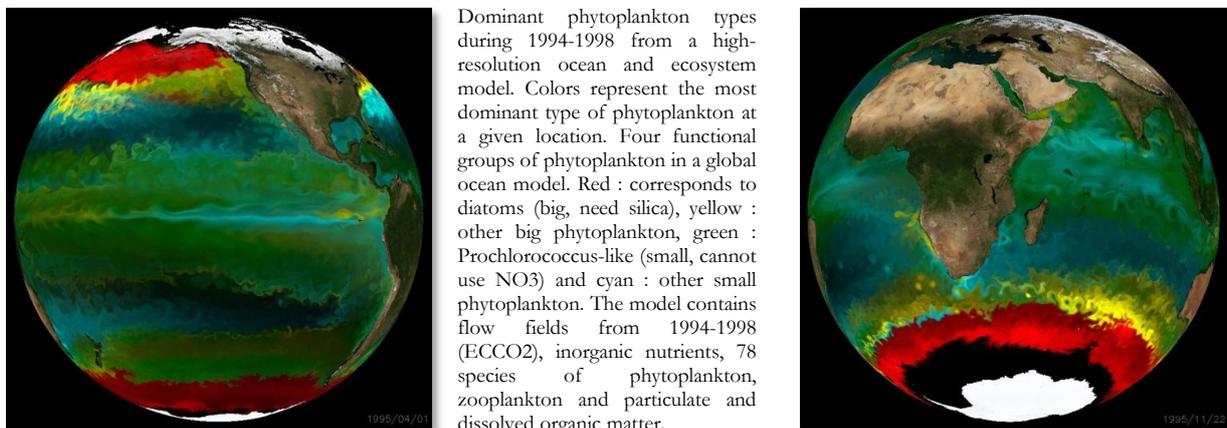
Nous postulons premièrement que :

Pour autant qu'il existe une diversité structurale et une distance à l'équilibre thermodynamique ( $D_{ET}$ ) des organismes vivants et des écosystèmes, celles-ci s'agrègeraient de strates en strates pour produire une diversité structurale des champs thermodynamiques AHL (atmosphère, hydrosphère, lithosphère) et une  $D_{ET}$  globale de l'Ecosphère (et de la Biosphère).

Celles-ci seraient entretenues en permanence par les organismes vivants intervenant tous ensemble comme une « fonction biogéochimique » organisée de l'Ecosphère (un écosystème planétaire).

Comme semble particulièrement l'illustrer cette modélisation planétaire des masses de plancton réalisée par le *Darwin project*.

Figure 118 : Modélisation planétaire des masses de plancton



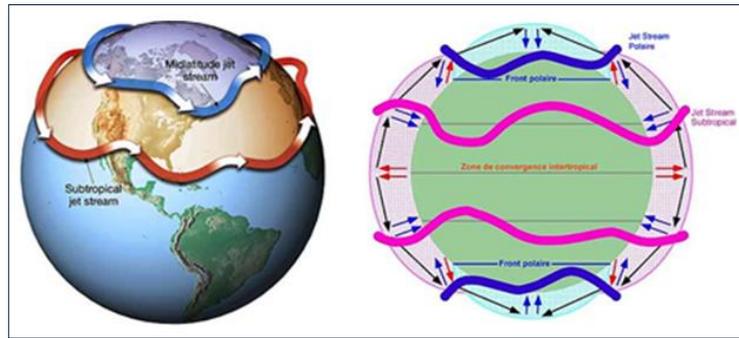
Source : [http://darwinproject.mit.edu/?page\\_id=27](http://darwinproject.mit.edu/?page_id=27)

Et cette fonction interviendrait, par le biais des cycles biogéochimiques, en feedback continu avec l'atmosphère, avec pour effet de réguler ses composantes géochimiques et maintenir l'efficacité de ses frontières thermiques.

Ce qui aurait généré une diversité structurale comparable des champs thermodynamiques de l'hydrosphère-lithosphère, et de l'atmosphère.

Comme semblerait le vérifier la figure suivante :

Figure 119 : Frontières thermiques et Jet Stream planétaires



Source : <http://la.climatologie.free.fr/>

Et nous postulons deuxièmement que :

- Les activités de l'Anthroposphère cumuleraient tous leurs impacts, depuis la diminution des territoires et de la biodiversité, structurale et biologique, des écosystèmes naturels, jusqu'aux émissions chimiques et rejets de pollutions multiformes des processus économiques et industriels, pour intervenir « de concert » sur la DET des organismes, écosystèmes et territoires.
- Ces impacts cumulés s'aggrèreraient de territoire en territoire pour intervenir sur la DET globale de l'Ecosphère (et de la Biosphère).

Ce dont le changement climatique, l'amoindrissement des frontières thermiques, l'affaiblissement du Golf stream, la fonte de la banquise, ..., ne seraient que les signaux les plus évidents, la fonction organique globale des compartiments AHL de l'Ecosphère étant elle-même en train de se déréguler, les cycles biogéochimiques de se désorganiser, et la sphère du vivant, consécutivement, d'en « mourir à petit feu ».

Quand il est d'usage de regarder isolément les impacts de l'économie sur l'environnement, et de les caractériser avec des unités de mesures différentes, et sous des angles multiples et peu convergents (batteries d'indicateurs), il est cependant légitime de se demander comment ces activités de l'Anthroposphère pourraient cumuler leurs impacts pour intervenir « de concert ».

La réponse sous-tendue par notre postulat serait que nous pourrions interpréter la quasi totalité (si ce n'est la totalité) des passifs de l'économie en termes de transformations chimiques et énergétiques, qui interviendraient toutes sur la stœchiométrie globale et les composantes p et V de l'exergie géochimique et biogéochimique, de l'un et/ou l'autre des compartiments AHL des écosystèmes et territoires ; au point de bouleverser leur diversité *différentielle* structurale et biologique, et d'atteindre leur DET.

Faisant ainsi que l'Anthropocène, par ses activités, vérifierait pleinement le principe de Clausius, et validerait une bonne partie des arguments d'Engels vis à vis de Podolinsky.

Ceci nous porte de la conjugaison pV.m pour un écosystème, à un système de mesure visant à comparer *les deux sens de la transformation* pour la DET des territoires, soit son augmentation (actif écologique) et sa diminution (passif écologique).

Ce qui ressemblerait à une vérification générale du second principe, sauf à mettre en exergue la grande différence entre les activités de la Nature et celles de l'homme, parfaitement symbolisées par ces formules très simples :

$$H = pV + U \quad (16) \quad \text{et} \quad dH = Vdp + dq \quad (17)$$

Nous ne pouvons que réserver à une étape ultérieure potentielle une quête de vérification globale et approfondie de notre postulat.

A partir d'un point « zéro », qui serait celui où les activités humaines ont commencé à vraiment contrarier le fonctionnement global de l'Ecosphère et de la Biosphère, par exemple le début du XXe siècle.

Et point zéro à partir duquel nous chercherions à reconstituer leurs  $D_{ET}$  telles que la fin du XIXe siècle les aurait connues, pour reconstituer ensuite leur évolution au prorata du développement de l'Anthropocène.

Nous développerons cependant dans cette dernière partie de notre thèse quelques principes conceptuels et méthodologiques élémentaires de cette vérification, que nous bouclerons par un essai de bilan stœchiométrique du Territoire.

Celui-ci posera face à face les résultats de nos bilans stœchiométriques concernant l'actif et le passif, et abordera une première mesure expérimentale (et bien maladroite) de la variation de  $D_{ET}$  de l'Ecosphère propre au Territoire, potentiellement engendrée par cette confrontation.

## 7.2.2 Quelques principes conceptuels et méthodologiques

### 7.2.2.1 Quid des impacts de l'Anthroposphère sur l'Ecosphère ?

Nous avons vu, au regard notamment des travaux sur l'exergie de Szargut, Valero et autres (2005), que toutes matières, chimiques, minérales et organiques, auraient leur équivalent en exergie ( $pV$ ), résultat d'une conjugaison spécifique de pression et volume, formatrice de leur « densité matérielle » (cf. notamment le tableau 7).

Il en ressort que les compartiments AHL de l'Ecosphère, plus particulièrement, auraient chacun une composition spécifique en exergie géochimique et biogéochimique (Valero, 2008).

Si les lois de conservation de l'énergie et de la masse semblent se vérifier, tant au niveau de l'Ecosphère que de l'Anthroposphère, il apparaît cependant que :

- L'énergie et la masse se déplacent « entre » les compartiments AHL (tableaux 34 et 61), et qu'en conséquence, la pression  $p$ , le volume  $V$  et l'exergie  $pV$  spécifique à chacun de ces compartiments « ne se conserve pas systématiquement »,
- L'Anthroposphère intervient directement sur cette transformation (tableaux 60 et 61).

Il en ressortirait finalement que nous pourrions appréhender toute pollution comme un déplacement d'exergie « entre » les compartiments AHL de l'Ecosphère, à énergie et masse constante de l'ensemble de l'Ecosphère ( $d(pV) = 1$ ).

### 7.2.2.2 Variation d'exergie entre compartiments AHL et variation de $D_{ET}$

Ces déplacements d'exergie se traduiraient, à masse et énergie constantes de l'ensemble, par une variation interne de pression/volume de ces compartiments, à quelque échelle d'analyse que ce soit.

Et ces variations, positives ou négatives selon, viendraient se cumuler, à l'échelle la plus globale, dans la « contradiction plus ou moins forte » des intensités énergétiques ( $pV$ ) de ces compartiments, fondatrice de la *diversité structurale* de l'Ecosphère.

Ceci pour finalement produire une certaine variation, positive ou négative, de sa  $D_{ET}$ .

### 7.2.2.3 Quid de la mesure en volume et pression de l'exergie des territoires, naturels et urbains ?

Comment ramener la mesure en exergie  $pV$  des compartiments AHL à leurs composantes essentielles de pression et de volume ?

Si nous connaissons la pression de l'exergie, nous connaissons de fait son volume ( $pV/p$ ), et inversement.

Or nous avons développé, tant pour l'actif que pour le passif, une mesure de tension de surface en  $J.m^{-2}$ .

Comment passerons-nous de ces derniers aux «  $J.m^{-3}$  », qui expriment la pression ?

Il s'agira de définir, pour les compartiments AHL, de dimension verticale moyenne « relativement » identique quel que soit l'endroit de la planète, des mètres de hauteur et profondeur « standard » par lesquels nous diviserons la tension de surface (biologique pour l'Actif, économique pour le Passif).

C'est par le cadre de calcul du Bilan stœchiométrique que nous les obtiendrons.

### 7.2.2.4 Cadre de calcul du bilan stœchiométrique (et thermodynamique)

A partir de ce moment, nous n'observerons plus la Biosphère et ses compartiments AHL en surface, mais en volume (et pression), comme ces champs thermodynamiques chers à Vernadsky, comparables en ces seuls paramètres au cylindre d'un moteur selon Carnot et Clausius.

Nous avons pour ce faire assigné à ces compartiments qui ensemble couvrent tant la surface de notre territoire que la surface terrestre, différentes hauteurs/profondeurs, pas forcément arbitraires.

A ce stade, et concernant la seule Ecosphère (où se développent les eucaryotes, autotrophes et hétérotrophes), nous avons assignées les hauteurs et profondeurs (moyennes) suivantes : Atmosphère (Troposphère) : 9793 m, Hydrosphère : 207 m, Lithosphère 5000 m, pour un total de 15.000 m.

Nous avons commencé à faire de même pour la Biosphère, qui a ses propres limites, mais trop de données étant manquantes et/ou ignorées, nous ne n'incluons pas dans le bilan stœchiométrique global du Territoire.

Ces hauteurs sont importantes, mais non fondamentales au stade actuel de précision de nos calculs. Nous considérerons en effet relativement « constants » (à notre échelle humaine), tant le volume global de l'Ecosphère que celui de ses compartiments (tout comme les surfaces CLC entre chaque campagne de mesure restent constantes), et ne porterons notre attention que sur la variation de pression des compartiments eux-mêmes.

Nous avons ainsi développé un tableau Excel spécifique dans lequel nous avons reportée, via nos tableaux stœchiométriques d'actif et de passif, la totalité des éléments connus du territoire examiné.

Ceci en présentant notre bilan comme il en a été de la synthèse de l'Actif écologique du Territoire (tableau 35), mais en le simplifiant et en ajoutant cette fois le passif écologique, soit :

Stocks de l'Ecosphère année  $n$  + flux de production (actif) année  $n+1$  - flux de consommation (passif) année  $n+1$  = Stocks de l'Ecosphère année  $n+1$ .

Tableau 64 (figure 120) : Cadre de calcul déployé du Bilan écologique, version B (du Territoire)

Territoire de référence :		Masse	Exergie (pV)	Exergie massique	pression (p)	Volume (pV/p)	Surface (ha)	103.949
Communes du Parc Naturel Régional des Préalpes d'Azur (PNRPA - 06)								Distance à l'équilibre structurale (DES)
Période de référence : 1999-2000								Base = p
		Grammes	Joules	KJ/g - MJ/kg	J/m3 = Pa	m3	m	Indice Ka (m)
<b>Bilan écologique (Version B : stoechimétrique)</b>								
<b>(1) Actifs écologiques - Stocks de l'Ecosphère année n</b>								
Athmosphère		N2						
		O2						
		Argon						
		CO2						
		Ne						
		He						
		CH4						
		H2						
		NO2						
		N2O						
		O3						
		CO						
		NH3						
	SO2							
	H2S							
	$\Sigma$ Troposphère sèche							
	Humidité troposphère	H2O						
	Exergie des matières biogènes							
Territoire (naturel)	Biomasse humide 1	CHL						
	Biomasse humide 2	GPL						
	Biomasse terrestre (CH2O)							
Hydrosphère	Humidité du sol	H2O						
	Eaux souterraines Ecosphère	H2O						
	Fleuves et rivières	H2O						
	Lacs	H2O						
	Ecosphère maritime	H2O +						
	Exergie des matières biogènes							
	Phyto et zoo planctons	CHL						
	Ressources halieutiques	GPL						
	Biomasse aquatique (CH2O)							
Lithosphère	Croûte maritime							
	Croûte continentale							
	Exergie des matières biogènes							
	Gaz naturel	CH2O						
	Charbons	CH2O						
	Pétrole et hydrocarbures	CH2O						
	Hydrocarbures (CH2O)							
<b>Total Ecosphère</b>								
<b>(2) Actif écologique - Flux de production de l'Ecosphère année n+1</b>								
Athmosphère	Energie libre de Gibbs (flux solaires) captée							
	Production d'oxygène	O2						
	Absorption gaz carbonique	CO2						
	Vapeur d'eau de la transformation	H2O						
	Eau absorbée (pluie, vapeur...)	H2O						
	Variation d'exergie des matières biogènes							
	<b>Total des sorties (flux)</b>							
Territoire (naturel)	Ressources halieutiques	CH2O						
	Biomasse humide 1	CHL						
	Biomasse humide 2	GPL						
	Dont eau contenue	H2O						
	<b>Total des entrées = Actif écologique (flux)</b>							
<b>(3) Passif écologique - Flux de consommation de l'Anthrosphère année n+1</b>								
Transformation de l'exergie consommée								
Anthrosphère	Méthanisation biomasse & déchets organiques	CH3O						
	Oxydation de biomasse terrestre	CH2O						
	Oxydation de biomasse halieutique	CH2O						
	Oxydation hydrocarbures	CH2O						
	Oxyd./méthan. biomasse & et hydrocarbures	CH2O						
	Consommations d'eau	H2O						
	Autres transformations de l'exergie	...						
	<b>Total des sorties = Passif écologique</b>							
Exutoires de l'exergie transformée								
Athmosphère	Energie libre de Gibbs dissipée							
	Consommation d'oxygène	O2						
	Emissions gaz carbonique	CO2						
	Emissions gaz méthane	CH4						
	Vapeur d'eau (oxydation) et eau de méthanisation	H2O						
	Variation d'exergie des matières biogènes							
Anthrosphère	Croissance urbaine							
	Déchets chimio-organiques	CH2O						
	Eaux d'épuration	H2O						
Hydrosphère	Rejets de déchets chimio-organiques (boues d'épuration, ...)							
Lithosphère	Stockage de déchets (organiques, minéraux et chimiques)							
Ecosphère	<b>Total des entrées (urbanisation, émissions, rejets,...)</b>							
<b>(4) Actifs écologiques - Stocks de l'Ecosphère année n + 1</b>								
<b>Idem stocks année n + solde actif/passif année n + 1</b>								
<b>Total Ecosphère</b>								
<b><math>\Sigma</math> des variations année n &amp; n + 1 = Energie, masse &amp; volume constants</b>								

### 7.2.2.5 Estimer la variation de $D_{ET}$ entre année $n$ et $n+1$ .

Si nous avons tant soit peu pu remplir le cadre stœchiométrique du bilan du Territoire, et légèrement celui de la France, il est bien évident qu'à l'échelle mondiale, nous n'avons pu intégrer que quelques données générales du bilan terrestre d'exergie établi par Valero (2008).

Toujours est-il que, compte tenu de nos nouveaux tests sur un indice  $K_a$  basé sur la pression et non plus l'exergie (paragraphe 4), nous avons pu faire une première mesure de variation de l'indice entre les stocks (présumés) du Territoire, entre l'année  $n$  et l'année  $n+1$ .

L'indice  $K_a$  (n'oublions pas qu'il est fondé sur le volume et la pression (Loiret, 2013a)) semble à ce jour varier exactement dans le sens du solde plus ou moins négatif entre Actif et passif.

Il serait ainsi un indicateur fidèle, tout du moins d'« une variation » de distance à l'équilibre thermodynamique.

Pour peu que nous puissions remplir et consolider de proche en proche les mêmes tableaux territoriaux (soit établir à l'échelle mondiale l'équivalent des comptes du GFN (WWF, toutes années), il nous resterait plus dès lors qu'à mettre en corrélation les résultats d'un indice global avec les différents événements climatiques planétaires que notre planète connaît ces temps-ci.

### 7.2.2.6 Cas particulier de la biomasse allouée aux compartiments AHL

Le  $Be$  stœchiométrique est celui de la variation, entre une année  $n$  et  $n + 1$ , de pression et volume internes des compartiments AHL, à exergie, volume et pression « considérés » constants de l'Ecosphère globale.

Dans ce cas, les 3 compartiments sont considérés comme des volumes, c'est à dire des milieux, et l'hydrosphère et la lithosphère ne sont plus regardés de l'espace comme de simples surfaces planétaires.

Se pose alors, lors du recensement des ressources en biomasse, et de l'allocation de l'exergie « biogéochimique » correspondante à l'un des compartiments, la question du « milieu de vie » des organismes vivants.

Pour les organismes marins, aucun problème, ce sont des organismes qui par définition vivent dans le milieu aquatique.

Mais pour les organismes dit « terrestres », dans quel milieu (quel volume) vivent-ils ?

Sauf les taupes et les vers, il est bien certain que ce n'est pas « dans » la lithosphère.

Et nous dirait-on que les plantes terrestres vivent les racines enfoncées « dans » le sol, nous rétorquerions qu'il en est bien de même pour une grande majorité de plantes aquatiques, et qui pour autant restent aquatiques.

Ainsi, quand nous affecterons la biomasse dite « terrestre » à l'un des 3 champs thermodynamiques, nous l'affecterons au milieu « atmosphère », et non pas à la lithosphère.

Il deviendra dès lors beaucoup plus évident de voir alloués tous les hydrocarbures et la biomasse morte en voie de subduction au milieu lithosphère.

De fait, chaque compartiment AHL comportera dès lors deux composantes principales, l'exergie géochimique « biogène » du milieu, et l'exergie biogéochimique de sa biomasse, morte et vivante, contenue (CHL-GPL).

## 7.2.3 Résultat : Bilan écologique du Territoire (version B)

Tableau 65 (figure 121) : *Bilan écologique* du Territoire (version B, stœchiométrique)

Territoire de référence : Communes du Parc Naturel Régional des Préalpes d'Azur (PNRPA - 06) Période de référence : 1999-2000		Masse	Exergie (pV)	Exergie massique	pression (p)	Volume (pV/p)	Surface (ha)	103.949	
		Grammes	Joules	KJ/g - MJ/kg	J/m3 = Pa	m3	Hauteur Profondeur	Distance à l'équilibre structurale (DES) Base = p Indice Ka (m)	
<b>Bilan écologique (Version B : stœchimétrique)</b>									
<b>(1) Actifs écologiques - Stocks de l'Ecosphère année n</b>									
Athmosphère	Exergie des matières biogènes	Σ	7,99E+15	6,36E+17	0,080	6,25E+04	1,02E+13	9,793	1,03E-11
Territoire (naturel)	Biomasse terrestre (CH2O)	Σ	7,11E+13	5,99E+17	8,430	7,00E+09	8,56E+07	0,082	1,29E-01
Hydrosphère	Exergie des matières biogènes	Σ	2,09E+17	9,95E+18	0,048	4,64E+07	2,14E+11	206,1	5,67E-06
	Biomasse aquatique (CH2O)	Σ	2,04E+13	1,43E+17	6,970	6,85E+09	2,08E+07	0,020	1,23E-01
Lithosphère	Exergie des matières biogènes	Σ	1,19E+19	2,81E+22	2,363	5,41E+09	5,20E+12	5,000	7,69E-02
	Hydrocarbures (CH2O)	Σ	2,50E+13	2,63E+17	10,51	1,99E+08	1,32E+09	1,269	1,04E-04
<b>Total Ecosphère</b>		Σ	1,21E+19	2,81E+22	2,321	1,80E+09	1,56E+13	15,000	<b>DES1</b> 0,1950
<b>(2) Actif écologique - Flux de production de l'Ecosphère année n+1</b>									
Athmosphère	Energie libre de Gibbs (flux solaires) captée	Σ		-4,14E+16					
	Variation d'exergie des matières biogènes	Σ	-5,78E+13	-1,25E+15	0,022				
	<b>Total des sorties (flux)</b>	ΣS	-5,78E+13	-4,26E+16	0,737				
Territoire (naturel)	<b>Total des entrées = Actif écologique (flux)</b>	ΣE	5,78E+13	4,26E+16	0,737				
<b>(3) Passif écologique - Flux de consommation de l'Anthrosphère année n+1</b>									
Transformation de l'exergie consommée									
Anthrosphère	Oxyd./méthan. biomasse & et hydrocarbures	CH <sub>2</sub> O	-1,09E+12	-1,10E+16	10,08				
	Consommations d'eau	H <sub>2</sub> O	-5,32E+13	-2,34E+15	0,044				
	Autres transformations de l'exergie	...	-9,30E+12	-2,19E+16	2,360				
	<b>Total des sorties = Passif écologique</b>	ΣS	-6,35E+13	-3,53E+16	0,555				
Exutoires de l'exergie transformée									
Athmosphère	Energie libre de Gibbs dissipée	Σ		1,05E+16					
	Variation d'exergie des matières biogènes	Σ	1,08E+12	5,05E+14	0,469				
Anthrosphère	Croissance urbaine	Σ	3,63E+12	1,09E+16	3,014				
Hydrosphère	Rejets de déchets chimio-organiques (boues d'épuration, ...)	Σ	5,70E+13	5,18E+15	0,091				
Lithosphère	Stockage de déchets (organiques, minéraux et chimiques)	Σ	1,82E+12	8,17E+15	4,500				
Ecosphère	<b>Total des entrées (urbanisation, émissions, rejets,...)</b>	ΣE	6,35E+13	3,53E+16	0,555				
<b>(4) Actifs écologiques - Stocks de l'Ecosphère année n + 1</b>									
Athmosphère	Exergie des matières biogènes	Σ	7,98E+15	6,36E+17	0,080	6,24E+04	1,02E+13	9,793	9,97E-12
Territoire (naturel)	Biomasse terrestre (CH2O)	Σ	6,93E+13	6,23E+17	8,991	7,28E+09	8,56E+07	0,082	1,35E-01
Hydrosphère	Exergie des matières biogènes	Σ	2,09E+17	9,95E+18	0,048	4,65E+07	2,14E+11	206,1	5,52E-06
	Biomasse aquatique (CH2O)	Σ	2,04E+13	1,43E+17	6,970	6,85E+09	2,08E+07	0,020	1,20E-01
Lithosphère	Exergie des matières biogènes	Σ	1,19E+19	2,81E+22	2,363	5,41E+09	5,20E+12	5,000	7,49E-02
	Hydrocarbures (CH2O)	Σ	2,10E+13	2,46E+17	11,71	1,87E+08	1,32E+09	1,269	8,91E-05
<b>Total Ecosphère</b>		Σ	1,21E+19	2,81E+22	2,32	1,80E+09	1,56E+13	15,000	<b>DES2</b> 0,1966
<b>Σ des variations année n &amp; n + 1 = Energie, masse &amp; volume constants</b>		ΣΔ	0,00	0,00		0,00	0,00	0,00	<b>Δ DES</b> 0,0016

## Commentaires :

### Sur le concept général :

La version A du bilan allait de l'actif au passif et regardait le potentiel d'écodéveloppement local. Elle opposait les capacités de production annuelle de l'actif du Territoire à l'ensemble des consommations, directes et indirectes de la population urbaine correspondante, en utilisant une valeur de référence économique (l'exergie utile).

Elle avait ainsi vocation à mettre en exergue le niveau global de soutenabilité *économique* de la consommation de cette population au regard des possibilités réelles de son territoire écosystémique rattaché.

La version B va du passif à l'actif et regarde le potentiel de soutenabilité *écologique* du passif écologique. Sa vocation est d'étudier l'ensemble des impacts de la consommation locale selon un concept où tous les impacts des consommations directes et indirectes (y compris les émissions de CO<sub>2</sub> produites par exemple en Chine du fait du produit importé consommé localement) seraient rapportés au territoire.

Elle est bâtie sur le principe selon lequel, ces impacts s'agrègeront progressivement, de territoire en territoire, jusqu'au niveau planétaire, pour agir, à masse, énergie et volume constants, sur la distance à l'équilibre globale.

Les grands exutoires dans lesquels nous rejetons nos déchets, l'atmosphère et l'hydrosphère, ne connaissent pas de frontières, et cumulent leur effets à une échelle planétaire entièrement déterritorialisée ; dans le principe donc, que nous émettions ou rejetions indirectement en Chine ou directement en France, cela aura le même effet global.

Cette version du bilan a donc pour vocation d'être agrégée aux résultats des autres territoires, pour globaliser les effets, ce qui a un impact direct sur les postes du bilan.

### Sur les postes du bilan :

Comme on peut le voir dans le tableau 31, le Territoire dispose de 119 ha de plans et cours d'eau, soit 1/1000 de sa surface totale, ce qui ne constitue certes pas une portion de l'Hydrosphère, alors que pourtant elle est très présente dans les stocks d'actifs du Territoire.

Ceci est dû aux nécessités d'opposition de stocks potentiels d'actif, aux consommations effectives de ressources halieutiques du passif territorial provenant de l'hydrosphère, au delà des capacités réelles de production du Territoire.

Il en est de même pour les ressources en hydrocarbures, pour lesquelles nous avons « alloué » au Territoire un potentiel en surface et hauteur, donc en volume, de lithosphère, contenant des actifs en énergies fossiles.

Mais ce potentiel n'est pas arbitraire, car il a été calculé sur la base de stocks mondiaux précisément évalués (Valero, 2008), que nous avons alloués au Territoire au prorata de sa surface.

Et nous avons procédé de la même manière pour les ressources halieutiques, sachant que les données globales sont ici très incorrectes.

Le procédé est artificiel, mais c'est le seul que nous avons trouvé pour pouvoir allouer à la collectivité locale l'ensemble des impacts effectifs de son passif, c'est à dire l'ensemble de « sa » responsabilité, sur l'écologie planétaire globale.

Et si les conventions d'une telle allocation devenaient un jour parfaitement précises, au point de pouvoir allouer à chaque population une partie exactement déterminée des

stocks mondiaux de l'Ecosphère, considérés comme « patrimoine commun » de l'humanité, l'agrégation des bilans locaux deviendrait alors à l'échelle globale une représentation équilibrée des impacts de l'Anthropocène sur l'Ecosphère et la Biosphère, au prorata de la consommation réelle des populations.

Sur les données du bilan :

Nous avons « recomposées » environ 2/5 des données du bilan, indisponibles pour de multiples raisons.

Ceci encore à partir de données planétaires sur les différentes ressources (Valero, 2008), de données sur l'atmosphère, etc.

Le grand intérêt du cadrage en surface et hauteur, donc en volume, et de nous donner des pressions potentielles et des unités de densité énergétique et massique qui facilitent grandement cette recombinaison.

Le cadrage général en « portion d'Ecosphère » du Territoire (sa surface spécifique  $\times$  par la hauteur standard de l'Ecosphère, soit 15.000 m de hauteur, au prorata de chaque compartiment AHL), nous donne un volume considéré constant.

Ceci nous donne un limite générale fixe à l'intérieur de laquelle toutes les données physiques recensées, chacune ramenées à de mêmes unités en exergie pV, en pression et surtout en volume, doivent forcément trouver une place qui ne saurait dépasser le cadre général en volume, quitte à être « bornées » par les données limitrophes.

Sur les résultats du bilan :

Toutes réserves émises sur les « artifices » que nous avons employés pour mener à son terme cette version du bilan, au caractère essentiel de « démonstration », ses résultats peuvent être, dans leur « globalité », considérés corrects au regard de notre objectif.

C'est à dire qu'ils ne varieront, sauf à modifier la convention d'allocation des ressources que nous avons adoptée, qu'à une très faible marge au prorata de toutes les corrections de données que nous serions amenés à faire.

Sa signification donc ne varierait pas de même, et nous pouvons selon nous l'interpréter ainsi :

Nous avons de part les limites naturelles de l'Ecosphère un volume territorial global parfaitement borné, considéré constant à l'échelle humaine, subdivisé en ses différents compartiments thermodynamiques, eux-mêmes de volume constant.

Et à l'intérieur de l'Ecosphère, une conservation de l'énergie et de la masse imposées par les lois de la thermodynamique.

Mais alors, si ces trois dimensions sont conservées, qu'est-ce qui change à l'intérieur de l'Ecosphère, que ce soit du fait de la direction de l'évolution, ou du fait de la directionnalité économique ?

A énergie (considérée) constante de l'Ecosphère, ce sont les transferts d'exergie pV « entre » ses compartiments.

A l'exemple des déchets organiques que nous soustrions au Territoire (considérés comme le sous compartiment biogéochimique de l'atmosphère - nous nous sommes expliqués dessus), que nous oxydons en partie pour transférer leurs émissions dans le sous compartiment biogène de l'atmosphère, et du solde réduit de ces déchets, que nous transférons finalement dans le compartiment hydrosphère.

Et comme le volume de ces compartiments est (considéré) constant, ne change alors que leur pression interne.

Ce qui nous ramène au chapitre III avec les premières mesures de distance à l'équilibre statistique ( $D_{ES}$ ) de la diversité structurale que nous faisons à propos de différentes molécules et matières organiques (tableaux 12, 13, 14 et 16 notamment).

Dans le cas du bilan, nous avons mesurée cette  $D_{ES}$  en nous basant sur la densité massique et la pression des 6 sous compartiments. Nous avons obtenus des résultats très comparables (il varient dans le même sens au millième près), mais à ceci près que la densité massique moyenne du sous compartiment est, compte tenu de l'hétérogénéité globale des données, moins fiable que la pression moyenne.

Nous n'avons donc retenu dans notre tableau que la  $D_{ES}$  mesurée sur la pression.

Celle-ci varie de manière « positive », ce qui est normal puisque, comme nous pouvons le constater dans nos tableaux respectifs concernant l'actif et le passif du Territoire, l'exergie totale « standard » (en non plus « utile » dans ce cas), produite sur le territoire est supérieure à l'exergie totale du passif (4,03E+16J contre 3,53E+16J).

Mais les exergies comparées de l'actif et du passif ne varient pas cependant dans une même proportion, l'exergie de l'actif est supérieure de 14% à celle du passif, et la  $D_{ES}$  de l'année  $n+1$  n'est supérieure que de 8/1000 à celle de l'année  $n$ .

Ceci s'explique du fait de la variabilité comparée de pression des sous compartiments du fait des différents rejets.

Ainsi donc, si au strict plan de la soutenabilité *écologique* du Territoire, celle-ci serait positive, au niveau de l'exergie, elle ne le serait pas autant au plan de la distance à l'équilibre thermodynamique (DET).

De multiples déductions et extrapolations de ces résultats pourraient s'en suivre, mais qui ne feront pas l'objet de notre présent travail, puisque nous n'avons réalisée qu'un seul calcul expérimental, pour des raisons déjà évoquées, quand de multiples comparaisons, dans des circonstances variées, s'imposeraient avant de pouvoir en tirer des conclusions généralisables.

Mais ces résultats nous portent cependant à rappeler que le Territoire est un parc naturel régional, et nous laissent considérer ce qui peut en être de collectivités strictement urbaines n'ayant que des jardins et espaces verts enclos à leur disposition, quand elles en ont !

Et ce qui peut en être de la France au total puisque, comme nous l'avons déjà dit, le Territoire peut être considéré sous un certain angle comme un modèle réduit du territoire français.

## . **Conclusion** générale.

## A. Exigences, autonomie et traitement du sujet

Dans nombre de pas en direction de son accomplissement, notre sujet de thèse, y compris la reformulation de ses objectifs, aura énoncé des exigences que nous ne suspicions pas d'entrée.

Nos questionnements sur les impacts écologiques des processus économiques n'ont commencés ni en 2010, début effectif de notre thèse, ni en 2005, année où nous avons découvert l'Empreinte écologique (Ee), mais en 1983, alors que nous étions stagiaire à l'INRA de Montpellier, et que nous fréquentions des chercheurs avancés dans les traductions concrètes de ce nouveau concept chapeau, l'Écodéveloppement, que la CNUED de 1972 avait promu.

Aussi, quand nous avons découvert l'Ee, en même temps que nous fumes enthousiasmés par le caractère syncrétique et communicant de cet outil prometteur, nous avions des capacités critiques (paragraphe 1.1.1.) nous permettant un certain recul quant à son appareil technique et à l'utilité de sa mise en œuvre pour les collectivités.

Mais c'est avec confiance dans son message et sincérité dans notre démarche que nous avons cependant entrepris divers travaux visant son application à l'échelle régionale.

Et nous n'avons pas ménagé nos efforts pour montrer, malgré la suspicion de nos collègues, que c'était l'outil qu'il fallait pour nous mener sur les voies concrètes d'un développement, durable ou soutenable, ou plus simplement *écologique*, que beaucoup ne voyaient alors comment traduire « sur le terrain » en actions transformatrices.

Jusqu'à notre mise en œuvre pilote approfondie de la méthodologie REAP (sections 6.1 et 6.2), et à sa suite notre projet de thèse primitif, adossé à l'Ee d'un espace naturel : *Valeurs de l'écodéveloppement*.

Et finalement jusqu'à notre découverte, contre nos convictions, mais grâce à notre appareil critique, des failles profondes de l'Ee, qui deviendront particulièrement évidentes pour l'actif d'un territoire naturel, mais concerneront tout autant le passif selon l'Ee.

Ce qui devait complètement modifier les objectifs de notre thèse, et nous faire passer, d'un approfondissement du connu, à une plongée dans l'inconnu d'une recherche qui fera vite connaître ses propres exigences.

D'abord la position de son sujet :

Une thèse n'existe pas de manière fortuite, ni ne se fonde par accident. Son sujet se positionne explicitement dans une lignée de travaux antérieurs, dont il dégage son autonomie.

C'est pourquoi, nous retrouvant trompés, comme par un mirage dans le désert, par le support auquel nous adossions naïvement nos travaux, il nous faudra rebrousser chemin et opérer un long détour, avant de pouvoir reconstituer une cohérence de nos sources propre à resituer nos travaux dans une lignée de questionnement explicite et historiquement fondée.

Nos objectifs de recherche étant reformulés, notre thèse aura basculée dans ses prémisses sur un mode contradictoire. Son déroulé initial empruntera pour beaucoup à la nécessité d'opposer à l'Ee : à son emprise restreinte un cadre comptable extensible à l'ensemble de la Nature, et à sa mesure de fertilité *économique*, une mesure de fertilité *biologique* fondée sur un référentiel épistémologique solide et cohérent.

Et ce n'est qu'après avoir apporté une réponse au premier volet de notre interrogation centrale, la désignation des *activités systémiques de la nature et de l'homme qui*

*caractérisent l'ordre et le désordre thermodynamiques comme opérateurs désignant l'actif et le passif écologiques*, que notre sujet trouvera les chemins de son autonomie définitive.

Nous serons remontés pour cela jusqu'aux fondements d'une mesure *biophysique* des actifs naturels, comme notamment la *théorie de l'accumulation énergétique* (Podolinsky, 1880), pour pouvoir ensuite longuement fonder, et finalement proposer, une mesure rendant compte de l'évolution dirigée, tout au long de l'histoire planétaire, des pressions et niveaux d'information de l'énergie biogéochimique, et avec elle de la diversité biologique.

Cette mesure deviendra ainsi, avec les méthodologies de calcul et la mise en œuvre du bilan qui la complèteront, notre réponse au second volet de notre interrogation centrale, sur cette *unité de compte ou de valeur, commune aux activités de la nature et de l'homme, qui permettra la mesure thermodynamique comparative de la production d'ordre et de désordre, et autorisera l'établissement d'un bilan révélateur des relations de cause à effet, et significatif des impacts cumulés ?*

Puis le développement de son sujet, en termes d'analyse autant que de synthèse :

Nous aurons dû nous adapter, et notamment faire appel à plusieurs disciplines, techniques et scientifiques, qui souvent débordaient nos connaissances de base, quand bien même nous étions relativement préparés. Et dès lors concentrer nos efforts sur l'exactitude de nos emprunts à leurs fondamentaux.

Mais nous aurons dû tout autant les concentrer sur les besoins d'agrégation et de mise en cohérence de nos travaux. Ce qui parfois nous aura renvoyés à quelque divergence d'interprétation entre disciplines. A l'exemple des traductions thermodynamiques et informationnelles de l'entropie, qui, d'évidence, n'ont pas tout à fait le même sens, vis à vis notamment de la notion d'équilibre, fondamentale dans nos travaux.

Au final, nos besoins d'intégration aurons pu nous trouver en situation de privilégier l'enchaînement démonstratif à l'exactitude de nos emprunts, au point de commettre quelque impair ou simplification abusive.

Nous espérons qu'en toute fin, cela n'aura pas grevé la cohérence d'ensemble de nos démonstrations et propositions.

Celle-ci s'imposait d'autant que le Bilan écologique a vocation à être transparent pour tous ; raison pour laquelle nous nous sommes souvent étendus, peut-être parfois plus que nécessaire, sur ces domaines diversifiés auxquels une construction relativement aboutie de nos propositions demandait à ce que nous fassions appel.

Le spécialiste aura passé les détails connus, si ce n'est pour lui superficiels, mais d'autres en auront peut-être tiré, comme nous-même, des rappels et éclaircissements, ou mieux encore, des pistes de réponse à quelque interrogation.

Nous devons pour notre part à tout lecteur de pouvoir trouver dans notre thèse une description globalement explicite de tous les ingrédients de construction, ainsi que de l'architecture, de notre bâtiment conceptuel.

Ne serait-il qu'à l'état d'esquisse détaillée ou de maquette précise.

Sa mise en œuvre en grandeur réelle et sa vulgarisation laissant supposer nombre d'approfondissements, de vérifications et de perspectives de recherche que nous aborderons plus loin.

Au bout de quoi nous aurons assumé notre sujet, et l'aurons traité, conformément aux exigences qu'il aura dévoilées, jusqu'aux limites que nous lui aurons assignées.

## B. Résultats comparés aux enjeux et objectifs

### 1. Rendre compte de la diversité biologique

C'était là l'objectif fondamental de notre recherche.

Après avoir introduit le cadre général du débat dans lequel prétend s'inscrire le Be, nous avons au tout début de notre thèse (première partie, chapitre I, section 1.1) dessinés son assise conceptuelle et son cadre opérationnel de mesure.

Après quoi nous avons progressivement approfondi le débat.

En début de section 1.2, nous avons positionné dans l'histoire des idées, après la Physiocratie, l'échec fondateur rencontré en 1882, notamment vis à vis du principe de Carnot/Clausius, par la première tentative de mesure biophysique du travail de la nature, la théorie d'accumulation énergétique de Podolinsky.

Echec à partir duquel nous avons posé en fin de section 1.2, comme conclusion de notre première partie, les deux composantes principales de notre problématique globale concernant la mesure du vivant :

#### (a) Quid de l'accumulation énergétique ?

Cette première composante, qui au premier plan questionnait l'interprétation du principe de Carnot/Clausius, marquait le début de notre seconde partie, et structura la première section de notre chapitre II, où nous avons abordé le cœur de notre sujet.

Elle aura fait l'objet d'une enquête épistémologique relativement approfondie, au cours de laquelle nous aurons cherché à reconstituer les phases d'une histoire un peu particulière des sciences naturelles, laissant apparaître que l'année même, 1922, où aux Etats Unis Lotka formulait son hypothèse séminale sur la *Direction de l'évolution*, Vernadsky présentait à Paris les premières réponses à celle-ci, bâties sur le terrain ferme et solide, dixit leur auteur, des *généralisations empiriques*.

Mais dans un contexte particulièrement mouvementé, qui faisait suite à la première guerre mondiale et à la révolution russe, et dont les prolongements, la seconde guerre mondiale et la guerre froide, expliquent que l'histoire des idées ait perdues les traces d'évolution *originelles* de cette confirmation approfondie des affirmations un peu précoces de Podolinsky, et des hypothèses construites de Lotka.

Réponse dont nous aurons partiellement reconstitué le cheminement, depuis le début du XXe siècle, chez les biologistes évolutionnaires allemands, et surtout russes, et qui aboutira en plusieurs étapes (1926, 1928, 1930) aux *deux principes biogéochimiques* de la Biosphère énoncés par Vernadsky.

Qui nous offrent les bases d'un *Quatrième principe* de la thermodynamique, longtemps recherché, souvent proposé, jamais confirmé.

Et pour lequel, suite à nos clarifications des principes de Vernadsky, qui firent l'objet, avant notre thèse, d'une publication spécifique (Loiret, 2012a), nous avons proposés, en conclusion de la section 2.1, quelques éléments de cadrage.

Complétés dans notre grande synthèse du chapitre II par une proposition de *fonction d'état des écosystèmes* (formules (37) et (38)), censée illustrer notamment le principe d'accumulation énergétique, et avec lui le concept de bilan écologique (paragraphe 2.5.2.).

## (b) Mesurer l'énergie biogéochimique du vivant

Cette seconde composante de notre problématique faisait directement suite aux réponses apportées à la première, notamment par Vernadsky.

Ses deux principes biogéochimiques faisaient particulièrement référence aux développements temporels successifs de la Biosphère et de l'Ecosphère (seulement absente dans son « terme » chez Vernadsky) ; et avec eux de la *matière vivante* (les procaryotes, qui ont fondé le *domaine* du vivant, la Biosphère) et des *organismes vivants* (les eucaryotes, qui ont bâtie la *maison* du vivant, l'Ecosphère).

Sur quoi Vernadsky avait établi une nette distinction entre l'énergie *géochimique biogène*, des sous produits du vivant (l'oxygène, l'eau libre, les gisements carbonés et minéraux divers, ...), aujourd'hui tous caractérisables en terme d'*exergie* (Szargut & Valero, 2005 ; Valero, 2008), et l'énergie *biogéochimique* du vivant lui-même, dont la dimension très spécifique ne saurait être caractérisée par la seule exergie.

Une énergie particulière, illustrant le travail de la nature et la pression de la biodiversité, qui aura fait l'objet de recherches approfondies de la part des théoriciens des écosystèmes, comme Odum avec l'émergie, et Jørgensen, avec l'éco-exergie.

Nous avons atteint là le cœur de notre sujet : une mesure de la diversité biologique via son produit direct, l'énergie biogéochimique.

Dont la problématique conclusive et les objectifs de résolution firent aussi l'objet de notre grande synthèse du chapitre II.

En conclusion de laquelle nous avons identifié le principe d'un indice de diversité « différentielle », qui mesurerait, depuis *l'équilibre thermodynamique*, le progrès « qualitatif » de l'information des organismes et de leurs écosystèmes, et donc leur « distance » à cet équilibre.

Cet indice serait une expression « informationnelle » de la diversité biologique, et de sa directionnalité énergétique. Utilisable à toutes les échelles du vivant, il deviendrait « conjugable » à la seule mesure en exergie des matières biogènes, pour nous donner finalement une mesure de l'exergie *biogéochimique*, comme mesure du vivant.

Conclusion sur les bases de laquelle notre chapitre III sera entièrement consacré à la mise au point de cet indice, avec des propositions élaborées en deux temps :

1 - Le mesure de la diversité structurale, par la distance à l'équilibre statistique ( $D_{ES}$ ), avec l'indice  $\bar{K}_a$ , en pourcentage du mètre comme unité de mesure.

2 - La mesure de la diversité fonctionnelle, par la distance à l'équilibre thermodynamique ( $D_{ET}$ ), avec le Joule.mètre ( $J.m$ ) comme unité de mesure.

Ces propositions, considérées dans leur globalité, après que nous ayons effectué au long de leur développement divers tests de corrélation, à plusieurs échelles du vivant, ainsi qu'une mise en œuvre comparative à l'échelle réelle d'un petit écosystème marin (Estuaire de Mondego, Portugal), semblaient faire écho aux enjeux d'une mesure biophysique des services écosystémiques, telle que notre directeur de thèse nous en avait dessiné les grands objectifs.

Ainsi qu'aux enjeux d'une mesure de la biodiversité, structurale et fonctionnelle, telle que la CBD en avait résumé le cadre général :

Le prochain stade du processus de développement d'un cadre unifié pour la soutenabilité est de lier les attributs structuraux et fonctionnels de la biodiversité aux mesures thermodynamiques de la perturbation anthropogénique [...] Combinant dans un cadre unifié les principes de la thermodynamique des écosystèmes, de la diversité biologique et de la diversité structurale, un tel bilan sera supposé conjuguer les attributs fonctionnels et structuraux de la biodiversité. [CBD, 2010].

Nos résultats et propositions firent donc l'objet, en sus de notre grande synthèse conclusive du chapitre II, d'une conclusion propre au chapitre III et à la seconde partie de notre thèse, essentiellement consacrée à la recherche.

Il s'agit de la section 3.5., où nous établissions une synthèse conclusive :

- Sur la recherche et ses résultats,
- Sur la signification *écosystémique* du Joule.mètre (J.m),
- Sur la signification *économique* du Joule.mètre.

Que notre lecteur voudra bien retrouver à leur place et dans leur étendue, que nous ne saurions ramener ici à quelques lignes sans qu'elles perdent ... leur signification !

## 2. Calculer l'actif et le passif écologiques du Territoire

La troisième partie de notre thèse, chapitres IV à VII, fut consacrée aux développements méthodologiques du calcul de l'actif, du passif et du bilan, ainsi qu'à leur mise en œuvre pour notre territoire de référence, le PNRPA.

Les résultats de l'actif et du passif auront été donnés sous une forme fonctionnelle et stœchiométrique, de telle manière à pouvoir présenter le bilan final en deux versions, A et B, reflétant l'une et l'autre forme.

L'objectif de cette distinction visait une double interprétation des résultats de l'actif et du passif, que ce soit en eux-mêmes ou comparés au niveau du bilan.

La **version A**, *fonctionnelle*, analytique, technique, locale, ponctuelle, effective, au caractère appuyé de constat, regarderait les intérêts *économiques* de la population concernée, et les capacités d'analyse de la situation et de décision des personnes impliquées.

Elle privilégierait l'analyse du passif écologique, total, direct et indirect, dans ses dimensions recadrées par la cohérence globale du TES biophysique, et ses diverses extrapolations, en termes d'énergie, de monnaie et de surfaces impliquées, jusqu'à l'indice d'autonomie territoriale.

Puis le comparerait aux actifs réels du Territoire.

L'*indice d'écodéveloppement* donnerait alors le ratio entre l'exergie « utile » du Territoire, conjugaison de la diversité structurale de ses espaces naturels et de leur production totale d'exergie, et l'exergie totale, directe et indirecte, consommée par les activités économiques et la population du Territoire.

Il soulignerait la relation, que nous avons cherché à mettre en exergue dans nos commentaires relatifs au concept d'écodéveloppement (paragraphe 7.1.2.1. et figure 117), entre la productivité énergétique de nos territoires naturels, issue de la *directionnalité de l'évolution*, et la *directionnalité économique* d'intensification énergétique des processus industriels, qui fonctionnerait à l'inverse de la première.

Il aurait vocation à ouvrir sur les voies d'un développement vraiment écologique.

La **version B**, *stœchiométrique*, synthétique, scientifique, globale, anticipative, prospective, regarderait l'intérêt écologique de tous, avec pour objectif d'être comparée au bilan des autres territoires de même niveau, et d'être avec eux agrégée jusqu'au niveau le plus large.

Cette version a comme nous l'avons dit un caractère expérimental prononcé, car de nombreuses données, ainsi que les moyens de les agréger, manquent aujourd'hui à son accomplissement.

Elle aurait vocation à vérifier le postulat que nous formulions en introduction de la section 7.2., selon lequel, pour autant que la  $D_{ET}$  des organismes vivants et des écosystèmes, agrégée de strates en strates, génèrerait une  $D_{ET}$  globale de l'Ecosphère, les impacts des passifs de l'Anthroposphère cumuleraient leurs effets jusqu'à intervenir sur cette  $D_{ET}$  de l'Ecosphère.

Ce postulat vérifié, la version B du bilan nous fournirait alors des seuils d'alerte à grande portée, faisant écho aux actions correctives entreprises localement, et propres à les faire converger dans le creuset d'une prise en charge commune et partagée de nos responsabilités (mouvement de masse).

C'est dans la réalisation d'un tel outil, dont la structure, le système de mesure et le mode de fonctionnement répondent aux enjeux et objectifs exposés dans notre introduction, que nous aurons ainsi porté les exigences de notre recherche.

## C. Signification et utilité du Bilan *écologique*

### 1. Une signification générale

Si des causes très disparates génèrent un effet commun, cet effet, rétrospectivement, renverra en miroir sur ses causes sa signification, et leur donnera sens et cohérence.

Ce fut ainsi l'aspect le plus réussi de l'Ee, que de nous faire rétrospectivement donner sens à toutes nos consommations élémentaires, en agrégeant leurs causes disparates dans un effet unique, l'*empreinte écologique*.

Jusqu'à donner un caractère générique à l'impact cumulé de nos produits et activités.

Au point que l'on estime aujourd'hui l'Ee, depuis celle d'un téléphone portable (qui serait équivalente, en gha, à celle d'un terrain de football) jusqu'à celle de l'économie mondiale, en passant par l'Ee d'une voiture, d'une maison, d'une ville, d'une nation,...

Ce qui ainsi, progressivement, nous fait prendre conscience de nos responsabilités.

Tout comme il en est de la mise en évidence, du bas vers le haut, des relations de cause à effet entre les activités humaines et le changement climatique.

De la même manière, la signification générale du Be résiderait dans l'établissement d'une telle relation de cause à effet.

Mais pour *les deux sens de la transformation*, et dans *les deux sens de cette relation*.

Expliquons-nous.

#### Premier sens de la relation, du bas vers le haut :

La signification du bilan version B, *stochiométrique*, résiderait en ce que les « déplacements » d'exergie matérielle (constituée d'une pression et d'une volume) produits par tout ce que nous consommons, notamment les rejets et déchets que nous transposons, sous diverses formes, d'un compartiment à l'autre de l'Ecosphère, s'agrègeraient, à volume considéré constant, dans un *effet commun*, la variation de pression spécifique de ces compartiments ; et en conséquence la variation, *négative*, de la  $D_{ET}$  globale de l'Ecosphère, c'est à dire son « entropisation », si ce n'est son « anthropisation » !

Sachant à l'inverse, comme nous avons cherché à le vérifier au long de notre thèse, que le travail d'*accumulation énergétique* de la Biosphère et de *montée en pression* de l'Ecosphère, aurait produit une *variation positive* de cette D<sub>ET</sub>.

Ce en quoi le bilan version B établirait une comparaison, elle aussi du bas vers le haut, entre *les deux sens de la transformation* tels que les interprétait Clausius.

Et donnerait selon toute probabilité, à l'échelle globale, un résultat très contraire à celui de notre essai concernant le Territoire (tableau 65).

Et ce en quoi il reviendrait à l'humanité, à cette échelle du constat, la responsabilité de chercher tous les moyens, par tous les moyens, d'inverser le sens *terrestre* de la conclusion *universellement pessimiste* que Clausius tirait d'une telle transformation (paragraphe 2.1.6.4.) :

Si dans tous les changements d'état qui se produisent dans l'univers, les transformations effectuées dans un certain sens surpassent celles qui se produisent en sens contraire, il faut que l'état de l'univers se modifie de plus en plus dans le premier sens, c'est à dire qu'il tende de manière continue vers un état limite [Clausius, 1865].

Que Clausius nommera *entropie de l'Univers*.

#### Deuxième sens de la relation, du haut vers le bas :

Cette identification des relations de cause à effet, ou dit autrement l'identification des responsabilités, est aujourd'hui de plus en plus évidente à l'échelle planétaire, dans le même temps où la responsabilité a été globalisée : *l'humanité est responsable du changement climatique !*

Mais elle semble par contre de plus en plus difficile à établir en redescendant les barreaux de l'échelle, jusqu'au niveau des territoires et aux individus qui les occupent.

Qui en effet est le responsable, de celui qui produit ou celui qui consomme, quand les étapes de production se multiplient, et quand les distances entre les uns et les autres sont de plus en plus importantes ?

Les phases de production passent par des process de plus en plus complexes, et les échanges internationaux déterritorialisent un nombre grandissant des sources d'émission et de rejets de passifs dont nous portons une part de responsabilité, à l'exemple des émissions de CO<sub>2</sub> relatives au tee-shirt que nous portons, qui aura été fabriqué en Chine puis transporté jusqu'à nous par de multiples moyens.

Il devient ainsi de plus en plus difficile de localiser et assigner les responsabilités diverses des produits que nous consommons.

Sommes-nous responsables de l'usine chinoise qui produit encore au charbon ?

Et inversement, des produits que nous fabriquons, dont nous exportons la responsabilité vers des destinations toujours plus lointaines et diversifiées.

Au point que les tomates qui provenaient de notre jardin, ou de notre voisin le maraîcher, auront aujourd'hui pu faire des centaines de km avant d'arriver dans notre assiette, quand celles de notre voisin seront peut-être consommées à des centaines de km.

Dans un tel contexte les relations de cause à effet deviennent de plus en plus complexes à établir, surtout du moment où il a semblé logique d'identifier, en sus de nos passifs *directs* (comme nos émissions de CO<sub>2</sub> quand nous cuisinons ou conduisons notre voiture), nos passifs *indirects*, à l'exemple de la fabrication du tee-shirt.

Au point que les chercheurs en économie écologique ont développé des méthodes Input/Output de plus en plus sophistiquées, pour balancer nos imports et exports

internationaux de passifs, de toutes origines et destinations, et en faire un bilan de la forme : production nationale + imports - exports (Cordier, 2011).

La question dès lors intervient de la signification, en termes de responsabilité, de la version A, *fonctionnelle*, du Be aux différentes échelles potentielles de sa mise en œuvre.

Où il s'agit encore de comparer les *deux sens de la transformation*.

A l'échelle d'une exploitation agricole ou forestière, la responsabilité se dégagera directement de la comparaison actif/passif, en nous donnant un bilan de productivité énergétique de l'exploitation, tout comme nous l'offre l'analyse énergétique depuis Podolinsky (tableaux 1 à 3).

La responsabilité incombera alors, à priori, à l'exploitant, et il lui reviendra de prendre ses décisions au regard du résultat, en passant par exemple en production biologique.

Mais si nous le mettons en œuvre pour une collectivité territoriale, les responsabilités alors se diluent, se croisent et se répartissent dans les diverses strates du processus de production et de consommation, du niveau industriel à celui des ménages, de l'échelle internationale à l'échelle locale, de l'échelle collective à l'échelle individuelle.

Et c'est cette fois, du haut vers le bas, l'impossibilité d'établir des relations de cause à effet qui devient évidente.

Ce en quoi le bilan version B pourrait alors nous aider, par rétroaction sur la version A.

En nous montrant que tous les impacts de toutes nos consommations s'agrègeraient dans un effet commun globalisé, qui un jour reviendrait sur nous, sous diverses formes et quel que soit l'endroit où nous nous trouvons sur la planète, il nous autoriserait en effet à formuler le principe d'une « convention générale » de responsabilité.

Selon laquelle nous serions responsables, à l'échelle des collectivités auxquelles nous appartenons, tout aussi bien de leur passif que de leur actif écologiques.

Mais plus encore, du solde de la comparaison des deux sens de la transformation que leur bilan fonctionnel aurait signifié avec *l'indice d'écodéveloppement*.

Alors, tout comme l'exploitant agricole, il deviendrait de notre responsabilité et de celle de notre collectivité, de chercher et mettre en œuvre, à l'échelle locale, tous les moyens de passer à un indice positif.

Au long d'un chemin dans le sens duquel le bilan et ses composantes auraient leur utilité et leur vocation à nous aider.

## 2. Une utilité territoriale : Rendre le constat explicite, orienter vers de nouvelles activités

**Le passif écologique**, ou TES *biophysique*, aurait d'abord, pour chaque échelle de territoire impliqué, un caractère pédagogique, utile à la prise de conscience.

Il nous montre, comme reflet supposé du TES *monétaire*, qu'il n'est pas une seule once de matière et d'énergie entrant dans le circuit économique, qui ne serait issue des ressources en exergie de l'Ecosphère, quitte à avoir été auparavant concentrée par l'homme (capital fertilité de production), et sauf à ce que les processus économiques captent directement l'énergie libre, avec un bilan énergétique positif.

Qui alors pourrait dire que le capital serait substituable à la rareté de ces ressources ?

En ce même reflet, il nous montre aussi l'unité de fonctionnement, et l'unité d'impact, de nos productions économiques et de nos consommations ménagères, qui dans leurs implications diverses se croisent les unes avec les autres pour converger dans une même direction, le développement urbain et ses indissociables impacts.

A l'exemple du tableau 60, selon lequel plus des 2/3 de notre consommation se transformerait en déchets, ou encore du tableau 59, qui montrerait que la tension de surface (l'intensité en énergie du sol) des décharges (78 TJ/ha), serait, sauf erreur, pratiquement 1.000 fois supérieure à la tension de surface de l'agriculture (0,079 TJ/ha). Ce qui, si nous prenons en compte la surface de 7.628 ha des décharges françaises donnée (par CLC) pour l'année 2000, nous permet d'en déduire que cette exergie, composée d'environ 50% de matières organiques, devrait pouvoir alimenter, disons, pour le moins, sans trop « simplifier », ... un à plusieurs millions d'ha de surfaces agricoles.

Il apporterait par ailleurs un outil *simplifié* d'analyse comparative, permettant aux décideurs et à toutes autres personnes responsables, d'étudier les différents postes de consommation de la collectivité, que ce soit par secteur de production industrielle ou de consommation des ménages,...

... et de décider et de toutes actions visant une extension de « durabilité » de la collectivité ...

... au regard des différents critères économiques et environnementaux, élargis par les extrapolations du passif telles que nous les avons déclinées :

- Les consommations d'exergie matérielle, des entreprises et des ménages, directes et indirectes,
- Leurs équivalents en TEP/habitant,
- Les émissions et rejets de polluants correspondants,
- Les ratios d'intensité monétaire des consommations d'exergie, etc.

Le passif écologique rapporté aux types de surfaces du territoire, vues comme des zones d'activité, permettrait notamment, comme avec l'*indice d'autonomie territoriale* (cet indice pouvant être probablement corrélé au niveau d'emploi local), de tirer nombre de ratios et indicateurs quant à la dépendance et/ou l'autonomie *économique* de la collectivité :

- Au niveau d'ensemble, pour les différents postes de ses capacités surfaciques,
- Au niveau plus détaillé des activités spécifiques développées à l'intérieur de ces différents espaces ; et ce depuis l'agriculture, biológico-autonome ou chimio-dépendante, jusqu'aux activités diverses (transport, usines, ...) des espaces industriels ou urbanisés de ce territoire.

**L'actif écologique** devrait pouvoir quant à lui, offrir à une collectivité une dimension supplémentaire en direction de sa « résilience » :

- Disposer d'un indice synthétique de la « santé » de son territoire naturel, et de sa variation temporelle, exactement comme nous tirions un indice de la santé d'un écosystème marin (section 3.4.),
- Valoriser comparativement cet indice par rapport à d'autres territoires de même niveau, et le situer au sein de l'indice plus large des territoires dans lesquels s'insère la collectivité étudiée (département, région, nation, ...).
- Etudier le développement de toutes activités visant une augmentation de la production d'exergie *utile*, et d'énergies renouvelables, à travers l'amélioration des différents éléments de leur établissement, comme la diversité structurale et la biodiversité.

**Le bilan fonctionnel**, au delà de la simple « durabilité » des activités (économies d'énergie, recyclage des déchets, réduction des pollutions, ...), devrait enfin pouvoir amener, progressivement s'entend, la collectivité vers une nouvelle orientation de son « complexe » d'activités territoriales, voir à en déduire/projeter une « organisation nouvelle » de ses surfaces/zones d'activité, et à en estimer les effets directs, tant en termes de pollutions diverses, que d'autonomie alimentaire, énergétique, et *écologique*.

Ce qui, avec l'*indice d'écodéveloppement*, représente une toute nouvelle strate des incidences potentielles du bilan quant à l'orientation des activités d'une collectivité.

C'est en effet à ce stade qu'il serait envisageable de *repenser* à l'Écodéveloppement (Sachs, 1979).

Et à en extraire toutes directives d'exploration, d'orientation, de définition et de mise en œuvre d'activités aux concepts et critères entièrement renouvelés, à l'aune d'une « éco-croissance » et d'une conception nouvelle de la *rentabilité*, la *rentabilité écologique*, vue comme une œuvre d'utilité générale et d'intérêt national.

Mais faudrait-il pour autant « repenser » l'écodéveloppement ?

Que d'évidence, son propre père a perdu en chemin ! (Sachs, 2007 : *La troisième rive. A la recherche de l'écodéveloppement*).

### 3. Une utilité globale : Caractériser les voies d'un développement écologique

Au début de notre thèse (section 1.1), nous parlions de l'*écodéveloppement* comme d'un concept intuitivement saisissable, après une longue expérience, mais dont la pratique a montré qu'il était, pour nombre de personnes, y compris des ingénieurs en environnement, rationnellement indifférentiable du *développement soutenable*.

Il semble bien que l'écodéveloppement, concept chapeau de la CNUED de Stockholm, en 1972, se soit trouvé impropre à répondre à une situation où le concept *chapeau*, descendant (Top down) des sphères supérieures de la réflexion (les différentes conférences internationales), devait, par sa *rationalité*, se trouver en capacité de nous guider jusqu'au bout dans son accomplissement, et de surdéterminer les actions susceptibles d'en rendre compte.

Ce qui serait l'une des raisons pour lesquelles il fut évacué de la réflexion mondiale, dans des conditions qui ont été relatées (Sachs, 2007 ; Berr, 2008), et remplacé par le développement soutenable (CNUED, Rio, 1992).

Et c'est ainsi que l'Ee a elle-même été pensée (Rees, 1992) et développée (Wackernagel, 1994) depuis Rio comme un outil d'accompagnement, au processus descendant, par lequel elle répondrait aux valeurs du nouveau concept en permettant leur déploiement, comme une fontaine à étages, depuis le niveau global de leur formulation jusqu'au niveau local de leur mise en œuvre (Penser globalement et agir localement !).

Mais le développement soutenable, aussi durable soit-il, sera dès ses débuts reconnu comme trouble et ambigu, notamment au regard de l'écodéveloppement (Boutaut, 2005 ; Berr, 2008).

Et Wackernagel se retrouvera dans la position très difficile, de devoir à la fois *clarifier* le concept, et d'en *rendre compte*, au moyen du même outil.

Jusqu'à ce que les contradictions du concept se reflètent dans l'outil.

Pour notre part, quand nous devons primitivement développer notre thèse autour des *Valeurs de l'Écodéveloppement*, nous devons comme nous l'avons dit aux contradictions de l'outil en question d'avoir dû revenir en profondeur sur nos objectifs initiaux.

Et nous lui devons du même coup de ne pas nous être retrouvés, nous aussi, en situation de devoir « repenser » l'écodéveloppement, et le transformer en un vaisseau amiral auquel nous aurions fait descendre les étages de la fontaine, et que chaque nouvelle vague aurait battu, jusqu'à ramener sur nos plages les débris de son épave.

Puis au final d'avoir procédé à l'inverse. Nous aurons cherchés, par le biais d'un outil dont la logique serait, tant qu'il nous serait possible, rigoureuse, autonome, transparente et opposable à chacun, « comment caractériser », par une *rationalité nouvelle* de la mesure des relations homme-nature, le développement recherché à l'échelle concernée.

Au point que les *valeurs* puissent ressortir de sa *pratique*, plutôt que celles-ci cherchent en amont à le déterminer.

C'est ainsi qu'à la fin de notre thèse, il nous semble que la définition d'un développement *écologique* est devenue plus simple à formuler.

Dans une première approche, éco-économique, territoriale, faisant suite aux constats du bilan *fonctionnel*, et relative aux flux d'exergie comparés de l'actif et du passif écologiques, ce serait, sans omettre les droits de l'individu :

*L'ensemble des actions et activités susceptibles d'augmenter, dans le respect des droits de l'homme, l'indice d'écodéveloppement d'un territoire.*

Un tel développement, accompli, serait ainsi, en toute « écorationalité », une économie, humaine, locale, régionale, nationale, européenne, ..., dont l'indice d'écodéveloppement serait égal ou supérieur à 1.

Et dans une deuxième approche, globale, scientifique, faisant suite aux constats potentiels du bilan *stochiométrique*, et relative aux stocks d'exergie planétaires, ce serait :

*Un développement qui n'altère pas la distance à l'équilibre thermodynamique de l'Ecosphère et de la Biosphère.*

Le Be ainsi ne se présenterait que comme un *outil, utile* à la détermination des voies concrètes d'une activité humaine qui, plutôt que détruire nos actifs écologiques, accompagnerait le travail de la Biosphère et de l'Ecosphère vers le redressement d'une pente de l'Anthropocène jusqu'ici vouée à vérifier la conclusion de Clausius.

Ce qui nous mènerait à approfondir cette autre utilité, ou valeur ajoutée, d'un travail « conjoint » de la nature et de l'homme, mais élargi à la nouvelle nature de la Nature.

Le Be ainsi ouvrirait à de nouvelles perspectives de recherche et de développement.

## D. Approfondissement des résultats & perspectives de recherche

### 1. Regard d'ensemble sur une version pilote

Une fois nos constats établis quant aux limites de l'Ee, nous n'avions que deux options, compte tenu notamment de nos engagements contractuels et de notre âge : Abandonner notre thèse, ou traiter un sujet bien plus complexe en assumant jusqu'au bout ses objectifs reformulés.

Qui imposaient d'emblée que notre thèse soit portée jusqu'à un terme cohérent et abouti, dont le caractère *démonstratif* ne pourrait se fonder que sur des principes de calcul aux bases entièrement développées, et suivis d'exemples chiffrés.

Avec l'appui de notre directeur de recherche, nous avons choisie la seconde option.

Aussi, vue l'ampleur des enjeux, nous avons affronté notre sujet comme nous l'aurions fait d'une randonnée de haute montagne, ... de très longue durée !

D'une manière générale, tant que nous le pouvions, nous avons voulu au long de nos travaux reprendre la démarche de *généralisation empirique*, comme la décrivait Vernadsky (note 71). Et ne déduire nos propositions que de constats antérieurs établis, quitte à les clarifier et en faire la synthèse, comme nous aurons cherché à le faire avec les *deux principes biogéochimiques*.

Nous avons cependant été confrontés à nombre d'écueils et de positions établies, et avons dû émettre des hypothèses, faire des propositions, formuler un postulat,..., que nous avons vérifié pour autant que nous en avons eu les *moyens*.

Ce qui, vues les conséquences potentielles de certaines de nos propositions, pourrait être considéré comme trop léger dans l'ambition d'une reproduction élargie.

D'autant que, en ce qui concerne notre postulat d'un bilan de l'Anthropocène, introductif à la version stœchiométrique du bilan écologique (section 7.2), nous avons été clair vis à vis de sa vérification, qui ne saurait être accomplie qu'à travers des approfondissements et élargissements conséquents du seul « modèle réduit », relatif au Territoire, que nous avons fourni.

Aussi, il ne faudra interpréter notre résultat d'ensemble que comme une version *pilote*, comprenant de nombreuses limites, ou mieux encore comme l'esquisse représentative, la maquette organique, le projet, d'un bâtiment qui reste à construire.

A commencer par ses fondations, qui doivent trouver le sol dur de son ancrage.

Ce qui nous laisse envisager quelques perspectives d'approfondissement et de recherche concernant la vulgarisation de nos résultats :

- Vérifier, valider les hypothèses et élargir leur champ d'application,
- Boucler les concepts opératoires et principes de calcul,
- Développer le bilan *fonctionnel*
- Vérifier, valider le postulat du bilan *stœchiométrique*, et le développer
- Explorer les chemins d'un développement écologique.

Au bout de quoi notre thèse pourrait être regardée, sous un certain angle, comme un programme potentiel de recherche, qui serait lui-même entièrement à bâtir ; et dont nous ne pouvons que suggérer, sous forme abrégée, les principales pistes exploratoires.

## 2. Vérifier, valider les hypothèses, et élargir leur champ d'application

### Actif écologique

- Approfondir et développer les calculs de diversité structurale des organismes, écosystèmes et territoires, élargir leur champ d'application, aborder la diversité structurale des compartiments de la Biosphère et de l'Ecosphère,
- Approfondir, corriger, valider les concepts et fonctions proposées pour une thermodynamique des écosystèmes,
- Ne pas oublier le *Quatrième principe* de la thermodynamique,
- Vérifier les hypothèses et propositions concernant la mesure, puis le calcul de la distance à l'équilibre thermodynamique ( $D_{ET}$ ) du vivant,
- Approfondir et améliorer la connaissance des principes redox, adapter au prorata la mesure de la distance à l'équilibre de réduction ( $D_{ER}$ ) et d'oxydation ( $D_{EO}$ ),
- Développer sur ces bases un système diagnostique de santé des écosystèmes, marins et terrestres,
- Expérimenter ce système de diagnostic en grandeur réelle,
- Approfondir les principes de stœchiométrie d'un territoire naturel,
- Fonder les éléments de calcul de l'actif sur des relevés effectifs de terrain,
- ...

### Passif écologique

- Préciser et ajuster la Nomenclature d'Allocation des Activités aux territoires (NAAT14), la rendre au maximum compatible avec la nomenclature NES et la nomenclature CLC (et mieux encore EUNIS),
- Préciser les données d'entrée et la procédure d'agrégation du TES14 *monétaire*,
- Préciser la nature et les principes de conversion en exergie des données d'entrée du TES *biophysique*,
- Approfondir, ajuster, vérifier les principes d'établissement du TES *biophysique* (qu'il soit le parfait reflet du TES monétaire),
- Obtenir (de l'Insee) les tables validées de conversion NES/COICOP, pour autant d'années que disponibles,
- Reproduire le calcul de la SUT biophysique sur de longues périodes,
- Etablir des tendances et corrélations,
- Extrapoler les résultats du passif,
- Approfondir les principes de stœchiométrie urbaine,
- Approfondir les relations intensité énergétique ↔ intensité monétaire,
- Chercher des lois relationnelles entre valeur monétaire et mesure biophysique,
- ...

### 3. Boucler les concepts opératoires et principes de calcul

Nous n'approfondirons pas cette question, qui sera complétée et approfondie dans les paragraphes suivants.

Il s'agirait d'une étape intermédiaire entre la validation des concepts et le développement éventuel du bilan écologique, dans ses deux versions.

Précisons simplement que nos calculs furent fondés sur un nombre considérable de données, et de feuilles de calcul développées au long de deux phases différentes de recherche, concernant l'actif et le passif ; et dont les formats n'ont souvent pas été mis en cohérence, laissant supposer de nombreuses redondances et erreurs potentielles, malgré notre vigilance continue.

Il s'agirait ici notamment de valider, mettre en cohérence, simplifier et organiser nos différentes procédures de calcul, de l'actif et du passif, puis des bilans fonctionnels et stœchiométriques.

Dans l'objectif de les solidifier, de les rendre complètement opérationnels, d'en sortir un standard, et de les porter sur un grand système, le bilan stœchiométrique devant très probablement faire l'objet d'un système à part entière, serait-il relié au premier.

Puis de cadrer leur agrégation vers le haut (échelles nationales et internationales), et leur désagrégation vers le bas (échelles territoriales de plus en plus précises).

### 4. Développer le Bilan *fonctionnel*

Rappelons le caractère analytique, technique, local, ponctuel, effectif, de cette version regardant les intérêts *économico-écologiques* de la population concernée, et concernant les capacités d'analyse de la situation, de projection, de planification et de décision des personnes impliquées.

Selon cette version, son développement pourrait s'envisager à travers un organisme dédié et selon des options publiques, privées, ou en partenariat public-privé.

Et se subdiviser en plusieurs parties distinctes :

- (a) L'exploration approfondie du concept de bilan fonctionnel, avec un aspect éco-économique, qui nous semble particulièrement fondamental : Le rapprochement et l'étude des relations de réciprocité entre les concepts d'utilité écosystémique et d'utilité économique (paragraphe 7.1.2.2.), en reflet du rapprochement des valeurs biophysiques et monétaires.
- (b) La mise en œuvre et la comparaison d'applications sous nationales d'échelles diverses, comprenant une adaptation du bilan à ces différentes échelles.
- (c) Le développement, la mise en œuvre, la mise à disposition, la vulgarisation, la formation à l'usage, d'outils de diagnostics, d'évaluation (avant et après), de planification et de prospective concernant les personnes directement impliquées (décideurs politiques, associations, ...), aux échelles sous nationales.

De tels outils, locaux et de terrain, pourraient être coordonnés avec un grand système d'envergure nationale, de mise en cohérence et de fourniture des données de base, et de traitement statistique des résultats, et s'accompagner d'une communication au prorata.

- (d) La mise en œuvre et la comparaison d'applications nationales et d'échelle supérieure.

## 5. Vérifier, valider le postulat du bilan *stœchiométrique*, et le développer

Il nous semble inutile d'entrer dans les détails de ce point, qui porte en lui-même la logique des perspectives de recherche susceptibles d'en approfondir, vérifier, valider les différents aspects.

Rappelons simplement le caractère, synthétique, scientifique, global, anticipatif, prospectif, de cette version du bilan, qui regarde l'intérêt écologique commun et la prise de conscience de tous.

Loin de négliger les immenses progrès en matière de prise de conscience que nous devons aux travaux du GIEC depuis maintenant plus de 20 ans, la vérification de ce postulat (paragraphe 7.2.1.) pourrait au contraire appuyer le constat des origines humaines du changement climatique.

Ceci en fournissant d'une part un complément utile, et peut-être précieux, à la compréhension du fonctionnement global, redox, coordonné, « homéostatique », des compartiments de la Biosphère et de l'Ecosphère, avec leurs productions spécifiques d'exergie géochimique biogène et biogéochimique, et les pressions différentielles en résultant.

D'autre part en établissant des relations détaillées de cause à effet entre les différents impacts cumulés, dans le temps et dans l'espace, de l'Anthropocène, et la variation potentielle de  $D_{ET}$  de la Biosphère et de l'Ecosphère<sup>191</sup>.

La vérification de ce postulat pourrait y compris apporter des réponses à la question de l'« eau liquide », qui semble faire l'objet d'une boucle sans solution (à l'exemple de la poule et de l'œuf : *Est-ce l'eau liquide qui permet la vie, ou la vie qui permet l'eau liquide ?*), et d'une inquiétude particulière de la communauté scientifique ; sans compter les budgets faramineux engagés pour y répondre.

---

<sup>191</sup> Nous avons souvent utilisé ces deux termes accolés, parce qu'il nous semblait, d'une part, très probable de négliger le caractère spécifique du second en n'utilisant que le premier (compte tenu des usages de la communauté scientifique en la matière), d'autre part délicat de désigner le second sans le resituer vis à vis du premier.

## E. Explorer les chemins du développement *écologique*

Nous voici arrivés en toute fin de notre thèse.

En *conclusion* de sa *conclusion*, et en écho direct à ses préliminaires, nous reviendrons sur le débat engagé par Podolinsky, Engels et Marx, qui fut si mal conclu.

Souvenons-nous, Podolinsky avait formulé une *Théorie de l'Accumulation d'Énergie*, qui semblait mettre en avant *une loi de productivité du travail conjoint de l'homme et de la nature*, selon laquelle l'homme serait en capacité d'*augmenter* la quantité d'énergie solaire que la nature stocke d'elle-même sur terre.

Ce qui n'est pas un *détail*, quand aujourd'hui la totalité de l'activité humaine produit exactement le contraire, vérifiant ainsi la conclusion de Clausius.

Cette loi avait vocation à vérifier l'assertion primitive des Physiocrates : *La terre est la source de toutes richesses*, telle qu'elle fut ensuite élargie par Marx :

Le travail n'est donc pas l'unique source des valeurs d'usage qu'il produit, de la richesse matérielle. Il en est le père, et la terre la mère, comme le dit *William Petty* (Marx, 1867:47).

Assertion élargie à laquelle Engels adhéra complètement :

Le travail n'est pas la source de toute richesse. La nature est tout autant la source des valeurs d'usage (qui sont bien, tout de même, la richesse réelle !) que le travail, qui n'est lui-même que l'expression d'une force naturelle, la force de travail de l'homme [Marx et Engels, 1875].

Cette loi avait ainsi vocation à caractériser la notion très particulière d'un travail conjoint homme-nature, *originellement positionné au cœur de la reformulation marxiste de la Physiocratie*, qui établirait des relations positives entre la valeur *biophysique* des ressources naturelles (travail de la nature), le travail humain, et la valeur d'échange des marchandises.

Et qui ce faisant, permettrait d'instaurer un nouveau cycle relationnel positif, de nature *biogéochimique*, entre l'économie humaine et le travail de la nature.

Ce nouveau cycle relationnel étendrait les valeurs traditionnelles en usage dans l'*Oïkos*, tant à l'Anthroposphère qu'à la *nouvelle nature de la Nature*, pour finalement contredire, à la suite de la Biosphère et de l'Ecosphère, cette conclusion de Clausius sur les *deux sens de la transformation*, en augmentant la quantité d'énergie solaire que la nature stocke d'elle-même sur terre.

Mais Podolinsky lui-même avait dans la suite de son propos *annihilé* toute la valeur et l'enseignement potentiels de cette loi de productivité, avec sa fameuse métaphore :

Le monde végétal, ne produisant presque pas de mouvement mécanique effectif, ne peut aussi être envisagé comme un exemple d'une machine thermique parfaite. Mais en observant le travail de l'humanité, nous voyons devant nous justement ce que Sadi-Carnot aurait appelé *une machine parfaite* [...] A ce point de vue, l'humanité serait une machine qui non-seulement transformerait la chaleur et les autres forces physiques en travail, mais qui produirait aussi *le cycle réversif complet*, qui convertirait son travail en chaleur et en d'autres forces indispensables pour la satisfaction de ces besoins, qui pour ainsi dire ferait remonter à son foyer la chaleur produite par son travail [...] Voilà pourquoi nous pensons que c'est seulement le travail, et justement le travail musculaire, qui doit servir en dernier lieu de base pour la définition de la valeur de la production et c'est lui qui par conséquent entrera comme un élément prépondérant dans toute théorie socialiste d'une juste (ou, ce qui est équivalent, d'une exacte) distribution des produits [Podolinsky, 1880:9-11/12].

Et Engels, tout à sa critique de cette *absurdité*, avait fini par achever le travail de démolition entamé, en trois étapes distinctes.

En revenant tout d'abord sur le travail conjoint homme-nature, et en redressant les voies sur lesquelles Podolinsky s'était de toute évidence égaré :

Ce que l'homme fait délibérément par son travail, les plantes le font inconsciemment. Les plantes - et c'est déjà une vieille histoire - sont les grands absorbeurs et dépositaires de chaleur solaire en une forme changée. Par le travail, aussi loin qu'il fixe de la chaleur solaire (ce qui dans l'industrie et partout ailleurs est loin d'être toujours le cas) l'homme réussit à unifier les fonctions naturelles de consommation d'énergie de l'animal avec celles de recueil de l'énergie de la plante.

Podolinsky s'est égaré loin de sa *très précieuse découverte* en confondant les chemins parce qu'il a essayé de trouver dans les sciences naturelles une nouvelle preuve de la vérité du socialisme, et a ainsi confondu physique et économie [Engels, 1882].

En alignant ensuite sa critique sur les récentes conclusions de Clausius :

Ce que Podolinsky a entièrement oublié c'est que l'homme en tant que travailleur n'est pas seulement un fixateur de chaleur solaire *actuelle* mais un encore plus grand gaspilleur de chaleur solaire *passée*. Les stocks d'énergie, du charbon, des minerais, des forêts, etc., nous réussissons à les gaspiller, vous le savez mieux que moi. De ce point de vue, que ce soit la pêche ou la chasse n'apparaissent pas comme la fixation de nouvelle chaleur solaire mais comme l'utilisation jusqu'à la création de déchets de la chaleur solaire déjà accumulée [Ibid.].

Et en concluant finalement sur une *impossibilité* catégorique :

Dans l'industrie tout calcul prend fin : dans la plupart des cas, le *travail ajouté* au produit ne peut plus être exprimée en UC. Si, par exemple, c'est encore possible avec une livre de fil parce que sa ténacité et sa capacité de résistance peuvent à la limite, avec beaucoup de bruit et de peine, être réduites à une formule mécanique, cela apparaît déjà comme une pièce tout à fait inutile de pédanterie, et dans le cas d'un morceau de toile écrue, et encore plus dans le cas de tissu blanchi, teint et imprimé, cela devient absurde. La valeur de l'énergie d'un marteau, d'une vis ou d'une aiguille calculée en fonction du coût de production est une quantité impossible. A mon avis, il est absolument impossible d'essayer et d'exprimer les relations économiques en grandeurs physiques [Ibid.].

Conclusion d'Engels qui devait éliminer du débat la théorie, peut être la plus *maladroite*, mais aussi la plus *prometteuse* du siècle, et qui pour longtemps devait interdire toute tentative orthodoxe de mise en relation des valeurs d'usage et des valeurs d'échange.

Mais barrière de l'impossible que pour autant les successeurs de Podolinsky ne cesseront de repousser toujours plus loin, jusqu'à ce travail de corrélation réalisé par Odum (1983,...,1996) entre l'énergie libre indirecte accumulée dans les ressources naturelles, et la valeur monétaire.

Pourtant, grand paradoxe, si nous lisons avec attention la théorie, et mieux encore le *secret* de l'accumulation primitive du capital selon le grand mentor d'Engels (Marx, 1867, Huitième section, Chapitre XXVI - *Le secret de l'accumulation primitive*), cette accumulation fut entièrement fondée sur l'appropriation d'une plus-value des valeurs d'usage, le capital fertile de production, amassée pendant des siècles par le travail « conjoint » des petits paysans, de leur cheptel et de la nature.

N'y avait-il pas là, aux fondements de la théorie marxiste, une relation *directe* fermement établie entre les valeurs d'usage, *biophysiques*, ... et le capital !?

Le capital n'aurait-il donc aucun rapport avec les relations économiques, les valeurs d'échange et la valeur monétaire ?

Ou plus simplement, Engels n'aurait-il pas lu *Le Capital* !?

Nous avons cherché à éclairer au paragraphe 1.2.4 (*L'accumulation énergétique face aux Lumières*) la dérive scientiste d'Engels et de Marx, à partir de laquelle tous deux opteront finalement, sans regarder en arrière et en reprenant à leur compte la nouvelle *flèche du temps*, pour une théorie du travail essentiellement fondée sur la valeur d'échange.

Mais tout de même, « il ne faudrait pas exagérer ! », et mettre au rebus, au seul prétexte d'être inclus dans *le fleuve de l'évolution* (entropique s'entend), tout ce travail antérieur qui avait fait la renommée de l'illustre personnage.

Il nous semble ainsi que la loi de productivité conjointe du travail homme-nature n'avait pas tout dit des propriétés qu'elle était susceptible de révéler.

Propriétés tout à fait particulières qu'un chercheur de l'INRA, Claude Reboul, déjà cité, aura poussées, en ce qui concerne les « sols agricoles », à un degré d'analyse inégalé, avec ses *Déterminants sociaux de la fertilité des sols* (Reboul, 1977).

A partir desquels il aura défini le sol fertile comme un « produit social », et la fertilité comme le produit d'un « rapport social », seule source de formation d'un « capital fertilité de production » (Reboul, 1987), qui éclaire et donne *tout son sens* à la théorie marxiste de l'accumulation primitive.

Concepts que nous aurions voulu pouvoir longuement décortiquer, mais que la logique générale de notre démonstration aura repoussés comme un chasse neige en bordure du chemin.

Ou mieux encore devant nous.

Ce par quoi nous posons en toute fin de notre thèse une immense question concernant ce concept *socio-naturel* de *capital fertilité de production* :

*Comment l'élargir à la nouvelle nature de la Nature ?*

**Ce serait d'abord** faire de telle manière que les marchandises puissent contenir *en elles mêmes* leur propre valeur, leur propre utilité.

Ce qui supposerait, quelque part, de mesurer une nouvelle distance à l'équilibre « économique » ( $D_{EE}$ ) des marchandises.

A la suite de la  $D_{ET}$ , elle pourrait être composée de deux versants, celui de la nature et celui de l'homme, donnant « ensemble » aux marchandises leur utilité, d'usage et d'échange.

Il y aurait d'abord l'exergie « utile » des ressources matérielles (les deux composantes longuement entrevues de la  $D_{ET}$ ), et ensuite la valeur ajoutée du travail de l'homme ; c'est à dire une utilité spécifique de son travail, qui elle-même comprendrait deux composantes, énergétiques et informationnelles, la seconde étant relative à la valeur ajoutée par la *diversité fonctionnelle* de la créativité humaine.

Ce qui reviendrait finalement à introduire dans la production moderne des valeurs d'échange de la *chrématistique* (l'économie monétaire de marché), les anciens savoir-faire productifs de valeurs d'usage de l'*oikonomia* (l'économie traditionnelle non monétaire) !

**Ce serait ensuite** faire de telle manière à raccourcir de tous côtés les distances de transformation entre exergie utile de l'Ecosphère et exergie utile des produits du travail humain.

Depuis les activités de l'Anthroposphère ...

Comme nous pouvons déjà le vérifier en agriculture biologique, où la productivité « conjointe » ne cesse de s'améliorer, ou comme nous pourrions le vérifier dans le futur en sylviculture, en se référant par exemple au *pâturage sous couvert forestier* (Garrigue, 1978).

... jusqu'à la nouvelle nature de la Nature.

Comme l'auraient constaté dans le passé des anthropologues dans la forêt amazonienne (sources perdues), où la présence de l'homme aurait augmenté sa productivité.

Ou comme un groupe de chercheurs, composé d'archéologues, d'écologistes et de généticiens des plantes, semble être aujourd'hui en train de le constater ; l'antique présence de l'homme en Amazonie, avant la conquête européenne, aurait agi sur la qualité de ses terres noires et de sa biodiversité (*The domestication of Amazonia before European conquest* : <http://rspb.royalsocietypublishing.org/content/282/1812/20150813>)

Ce qui supposerait alors une *directionnalité conjointe* engendrant un bilan énergétique positif des relations homme-nature.

Pour une vérification potentielle de laquelle nous avons proposé dans notre thèse quelques outils permettant d'avancer dans cette direction, et d'évaluer les progrès réalisés.

Concernant l'utilité des marchandises, si nous analysons de plus près les relations entre les postes du TES monétaire et les postes d'un TES biophysique parfaitement « stabilisé », quitte à entrer de chaque côté dans le détail de ces postes, peut-être pourrions-nous mieux comprendre la montée en puissance progressive de la valeur ajoutée monétaire, relativement à une exergie utile donnée des ressources parcourant le processus économique.

Et partant de là, regarder comment la valeur ajoutée (énergétique et informationnelle), donnée par l'homme, prend le relais pour finaliser la valeur d'échange.

Et ainsi avancer, au désespoir de Marx et Engels, sur les voies d'interprétation d'une « D<sub>EE</sub> » des marchandises qui pourrait être fortement corrélée à leur valeur monétaire.

Ou sinon, sur les voies de fixation d'une valeur monétaire des marchandises qui serait fortement corrélée à leur D<sub>EE</sub> !!

Concernant enfin la diminution de distance entre les deux utilités du travail de la nature et de l'homme (paragraphe 7.1.2.2.), il ne peut s'agir que d'un long processus exploratoire de découverte d'un *nouveau monde* de valeurs, utiles à la croissance effective d'un *nouvel ordre, écoéconomique*, de forte diversifié *différentielle*, en direction duquel l'indice d'écodéveloppement, qui établirait en continu, aux échelles concernées, le bilan des exergies produites et consommées, serait susceptible de nous guider.

Comme nous le disions, les *Valeurs de l'écodéveloppement*, ou d'un développement *écologique*, respectueux de l'Homme et de la Nature, émergeront d'elles-mêmes tant que nous serons guidés par une juste mesure des progrès accomplis, reflet d'une éthique pragmatique des relations homme-nature (*écorationnalité*).

Ces valeurs seraient donc devant nous, prêtes à se révéler pour la nouvelle nature de la Nature, comme elles s'étaient révélées pour l'ancienne.

Richard Loiret, le 11août 2015

## Références significatives

- Amthor J. S., et autres, 1998. *Terrestrial ecosystem responses to global change : A research strategy*. Ecosystems Working Group. Environmental Sciences Division. Publication N° 4821.
- Ashby, W. Ross, 1952. *Design for a brain*. Chapman & Hall.
- Atlan, H., 1979. *Entre le cristal et la fumée*. Essai sur l'organisation du vivant. Editions du Seuil, Paris.
- Bailes, K.E., 1990. *Science and Russian culture in an age of revolutions*. V.I. Vernadsky and His Scientific School, 1863-1945. Indiana University Press.
- Bellamy Foster, J., & Burkett, P., 2004. *A Critical Essay : Ecological Economics and Classical Marxism*. The "Podolinsky Business" Reconsidered.
- Bailly, F., Longo, G., 2008. *Organisation biologique et entropie négative : A partir des réflexions de Schrödinger*. Edition électronique. Paru en anglais sous le titre : Biological organization and anti-entropy. Journal Biological Systems, Vol. 17, No. 1, pp. 63-96, 2009.
- Bel, Le Pape, Mollard, 1978. *Analyse énergétique de la production agricole - Concepts et méthodes*. INRA-IREP, juillet 1978.
- Berg, L.S., 1922. *Nomogenesis or Evolution determined by Law*. Translated from the Russian by J.N. Rostovtsov. The M.I.T Press. Massachusetts Institute of Technology.
- Bernal, M., 1987. *Black Athena. Les racines afro-asiatiques de la civilisation classique*. Puf, 1996, Paris.
- Berque, A., 1987. *ÉCOUMÈNE. Introduction à l'étude des milieux humains*. Ed. Belin, Paris.
- Berque, A., 2011. *La chôra chez Platon*. Paru dans Thierry PAQUOT et Chris YOUNÈS (dir.) *Espace et lieu dans la pensée occidentale*, Paris, La Découverte, 2012, 316 p., p. 13-27.
- Berque, A., 2014. *La ville insoutenable*. Colloque ANR PAGODE.
- Berr, E., 2008. *Le développement soutenable dans une perspective post keynésienne : retour aux sources de l'écodéveloppement*. Université de Bordeaux. GREThA UMR CNRS 5113.
- Black, J.N., 1971. *Energy Relations in Crop Production. A Preliminary Survey*. In ann. Applied Biology, 67, pp. 272-278.
- Bonsack, F., 1961. *Information, thermodynamique, vie et pensée*. Gauthier-Villars Editeur, Paris.
- Boutaut, A., 2005. *Elaboration de Critères et Indicateurs de Développement Durable pour les collectivités*. Thèse de doctorat, Ecole Supérieure des Mines de St Etienne en partenariat avec l'ADEME.
- Braudel, F., 1979. *Civilisation matérielle, économie et capitalisme*. 2. Les jeux de l'échange. Armand Colin, 1979.
- Brillouin, L., 1956. *Science and Information Theory*, New York, Academic Press, (traduction (fr) *La science et la théorie de l'information*, Masson, 1959).
- Burkett, P., 2006. *Marxism and Ecological Economics. Toward a Red & Green Political Economy*. Ed BRILL, Leiden, Boston.
- Burkett, P., & Bellamy Foster, J., 2008. *Podolinsky Myth : An Obituary Introduction to 'Human Labour and Unity of Force', by Sergei Podolinsky*. Historical Materialism 16 (2008) 115–161.
- Carnot, S., 1824. *Réflexions sur la puissance motrice du feu et sur les machines propres à développer cette puissance*.
- Cartelier, J., 1991. *François Quesnay. Physiocratie. Droit naturel, Tableau économique et autres textes*. Ed. GF Flammarion.
- Catton, W. R., 1980. *Overshoot : The Ecological Basis of Revolutionary Change*. University of Illinois Press, Urbana.
- CBD, 2002. *Strategic Plan for the Convention on Biological Diversity (COP 6, 2002)*. <https://www.cbd.int/decision/cop/default.shtml?id=7200>
- CBD, 2005. *Indicators for assessing progress towards the 2010 target : Ecological footprints and related concepts*. Montreal, 28/11-2/12 2005. <https://www.cbd.int/2010-target/framework/indicators.shtml>
- CBD, 2010. Secretariat of the Convention on Biological Diversity (UNEP). *CBD Technical series n°54 : Interdependence of Biodiversity and Development Under Global Change*. Part B. Background papers : B.2.3 *Strategic sustainable development : A synthesis toward thermodynamically efficient systems post-normal complex systems management*, written by Ibisch, P.L., Vega, E., Herrmann, T.M.

- CBD, 2011. *The Aichi Biodiversity Targets* (COP 10, 2010). <https://www.cbd.int/sp/targets/>
- CBD, 2014. Secretariat of the Convention on Biological Diversity (UNEP). *CBD Technical series n°78 : Progress Towards The Aichi Biodiversity targets An assessment of biodiversity trends, policy scenarios and key actions*.
- CESN, 2009. *Les indicateurs du développement Durable et l'Empreinte Ecologique*. République Française. Avis et rapports du Conseil Economique, Social et Environnemental, 2009.
- Chaboussou, F., 1980. *Les plantes malades des pesticides*. Editions Debard, Paris.
- Chaussod, R., 1996. *La qualité biologique des sols : Evaluation et implications*. Numéro spécial. Laboratoire de microbiologie des sols, Inra, 17 rue de Sully, 21034 Dijon.
- Chen, G.Q., 2004. *Exergy consumption of the earth*. Peking University, Beijing, China. *Ecological Modelling* 184 (2005) 363-380.
- Chen, G.Q., Jiang, M.M., Yang, Z.F., Chen, B., Xi Ji, Zhou, J.B., 2009. *Exergetic assessment for ecological economic system : Chinese agriculture*. *Ecological Modelling* 220 (2009) 397-410
- Clausius, R., 1865. *Sur diverses formes facilement applicables qu'on peut donner aux équations fondamentales de la théorie mécanique de la chaleur*. *Journal de mathématiques pures et appliquées*, 1865, pp. 361-400. Paris.
- Clements, F., 1916. *Plant succession, an analysis of the development of vegetation*. Carnegie Institution of Washington Publication 242, 1916.
- Cleveland, C.J., Costanza, R., Hall, C.A.S., Kaufmann, R., 1984. *Energy in the US economy: a biophysical perspective*. *Science* 225, 890–897.
- Cleveland, C.J., 1999. *Biophysical Economics: From Physiocracy to Ecological Economics and Industrial Ecology*. In *Bioeconomics and Sustainability: Essays in Honor of Nicholas Georgescu-Roegen*.
- CNEEMA, 1979. *Eléments d'appréciation de quelques intrants énergétiques en grande culture*. Bulletin interne n°259-260, Août-Septembre 1979.
- Cole, L.C., 1958. *The ecosphere. Man and the ecosphere*. Readings from Scientific American, San Francisco, 1971.
- Cordier, M., 2011. *Ecosystème estuarien et système économique régional : Faisabilité d'une intégration par modélisation Input-Output*. Thèse de l'UVSQ.
- Costanza, R. 1979. *The case for a constant embodied energy to dollar ratio*. *Journal of Geophysical Research*. 1:320-327.
- Costanza, R. 1980. *Embodied energy and economic valuation*. *Science* 210:1219-1224.
- Costanza, R., 1981. *Embodied energy, energy analysis and economics*. In: Daly, H.E., Umana, , A.F. (Eds.), *Energy, Economics and the Environment: Conflicting Views of an Essential Relationship*.
- Costanza, R., Herendeen, R.A., 1984. *Embodied energy and economic value in the United States Economy : 1963, 1967, and 1972*. *Resources and Energy* 6:129-164.
- Costanza, R., 2003. *The Early History of Ecological Economics and the International Society for Ecological Economics (ISEE)*. <http://isecoeco.org/pdf/costanza.pdf>.
- Da Cunha, C., 2010. *Quelle prise en compte de la biodiversité dans les enjeux de performance de l'activité agricole en Île-de-France ?* Thèse de doctorat de l'Université de Versailles Saint-Quentin-en-Yvelines (UVSQ).
- Daly, H., Umaña, A., 1980. *Energy, Economics, and the Environment : Conflicting views on an Essential Relationship*. Westview Press, Boulder CO.
- Deflandre, J., Jamet, M., Matarasso, P., Valette, F., 1987. MEPP 4.0. *Modélisation en Economie Physique et Prospective*. CNRS. Laboratoire « Modèles d'économie Physique ». Montpellier, octobre 1987.
- Deléage, J.P., 2002. Préface de la nouvelle édition française de *La Biosphère*, de W. Vernadsky. Editions du Seuil, 2002.
- Deltete, R.J., 2012. *Georg Helm's Chemical Energetics*. HYLE – International Journal for Philosophy of Chemistry, Vol. 18 (2012), No. 1, 23-44.
- Des Marais, D. J., 2003. *Biogeochemistry of Hypersaline Microbial Mats Illustrates the Dynamics of Modern Microbial Ecosystems and the Early Evolution of the Biosphere*. NASA, Ames research Center, Moffett Field, California, USA.

- Des Marais, D. J., 2008. *Origins and Cycling of CO<sub>2</sub> from Earth during the Archean and Proterozoic Eons*. In Delano, J.W., 2001, **Redox history** of the Earth's interior since approximately 3900 Ma; implications for prebiotic molecules: Origins of Life and Evolution of the Biosphere, v. 31/4-5, p. 311-341.
- Doat, J., 1977. *Le pouvoir calorifique des bois tropicaux*. Revue Bois et Forêts des tropiques, n°172, mars-Avril 1977.
- Driesch, H., 1914. *History and Theory of Vitalism*. Macmillan, London.
- Driesch, H., 1927. *Mind and Body*. Metheun, London.
- Ducrocq, A., 1989. *L'objet vivant*. Editions Stock, Paris.
- Engels, F., 1882. *Lettres des 19 et 22 décembre 1882 adressées à Marx à propos du « Podolinsky business »*. Source : Marx and Engels Correspondence, International Publishers (1968).
- Engels, F., 1883. *Dialectique de la Nature*. <http://pages.infinet.net/sociojmt>.
- Eriksson, B., Eriksson, K.E., Wall, G., 1976. *Towards an integrated accounting of energy and other natural resources*. Centre for Interdisciplinary Studies of the Human Condition, University of Göteborg, Mölndalsvägen 85, S-412 85 Göteborg, Sweden.
- ESPCI, 2000 (environ). *Entropie de Shannon, Théorie de l'information et compression des données*. Ecole supérieure de Physique et de Chimie industrielle de la ville de Paris. Préceptorat de Physique Statistique. Aux alentours de 2000.
- Falkowski, P.G., Fenchel, T., Delong, E.F., 2008(a). *The microbial engines that drive Earth's biogeochemical cycles*. Science, Vol 320, 23 may 2008, [www.sciencemag.org](http://www.sciencemag.org).
- Falkowski, P.G., Godfrey, L.V., 2008 (b). *Electrons, life and the evolution of Earth's oxygen cycle*. Institute of Marine and Coastal Sciences, Rutgers University, New Brunswick, USA.
- Falkowski, P.G., 2009. *The Once and Future Ocean*. Tenth Annual Roger Revelle Commemorative Lecture. Oceanography Vol.22, No.2.
- Fonseca J.C., et autres, 2000. *Nuclear DNA in the determination of weighing factors to estimate exergy from organism biomass*. IMAR – Institute of Marine Research, Department of Zoology, University of Coimbra, Portugal. Ecological Modelling 126 (2000) 179-189.
- Fonseca J.C., et autres, 2002. *Estimation of ecological exergy using weighing parameters determined from DNA contents of organisms – a case study*. IMAR – Institute of Marine Research, Department of Zoology, University of Coimbra, Portugal. Hydrobiologia 475/476 : 79-90, 2002.
- Forrester, J. W., 1961. *Industrial dynamics*. Waltham, MA: Pegasus Communications.
- Forrester, J. W., 1968. *Principle of systems*. Wright Allen Press, Cambridge, Massachusetts.
- Forrester, J. W., 1971. *World Dynamics*. Wright Allen Press, Cambridge, Massachusetts.
- Francour, P., 2007 (après). *Power Point : Energie - Effet de serre*. Université de Nice Sophia Antipolis (Unice).
- Garrigue, G., 1978. *Possibilités de pâturage sous forêt de pins maritimes*. Ecole nationale d'ingénieurs des travaux agricoles de Bordeaux, Chaire de productions animales.
- Georgescu-Roegen, N., 1971. *The Entropy Law and the Economic Process*. Harvard University Press, Harvard.
- Georgescu-Roegen, N., 1979. *La décroissance*. Entropie-Ecologie-Economie. Edition électronique.
- GFN, 1999, 2010. *National Footprint Accounts*. Global Footprint Network, Oakland, CA. : <http://www.footprintnetwork.org>.
- GFN, 2009. *Ecological Footprint Standards*. Global Footprint Network, Oakland, CA. : <http://www.footprintnetwork.org>.
- Gibbs, J.W., 1902. *Elementary principles in statistical mechanics*. Developed with special reference to the rational foundation of thermodynamics. Yale University, USA.
- Grenier, E., 2000. *Vladimir Vernadsky, De la biosphère à la noosphère*. Magazine Fusion, n°83, novembre-décembre 2000.
- Grinevald, J., 1994. Introduction à la seconde édition de *La décroissance* (Georgescu-Roegen, 1979).
- Grinevald, J., 1997. Introduction à l'édition américaine de *La Biosphère*. The Biosphere, Far West Institute, USA, 1998.
- Grinevald, J., 2002. *Biodiversité et Biosphère*. Une production originale du magazine L'État de la planète, [www.delaplanete.org](http://www.delaplanete.org), No 1 janvier – février 2002.

- Grinevald, J., 2013. *La Révolution Vernadskienne*. Actes de la table-ronde internationale « Héritage scientifique de Vladimir Vernadsky... ». Paris, 15 mai 2013.
- Grinin, L.E., Markov, A. V., Korotayev, A. V., 2009. *Aromorphoses in Biological and Social Evolution: Some General Rules for Biological and Social Forms of Macroevolution*. Paleontological Institute, Russian Academy of Sciences. Moscow Social Evolution & History, Vol. 8 No. 2, September 2009 6–50.
- Gubanov, V. G., Degermendzhy, A. G., 2008. *Biotic Turnover in Superorganism Systems : Several Principles of Establishment and Sustenance*. In : Biosphere origin and evolution, Springer editions, 2008.
- Haake, J., 2000. *Les stratégies des entreprises pour une utilisation des matières plus respectueuse de l'environnement : Une application du concept de dématérialisation à la gestion environnementale des entreprises industrielles*. Thèse de doctorat en sciences économiques de l'UVSQ sous la direction de S. Fauchoux.
- Haberl H., Wackernagel, M., Krausmann, F., Erb, K-H., Monfreda, C., 2004. *Ecological footprints and human appropriation of net primary production: a comparison*. Elsevier, 2004.
- Haberl, H., Erb, K-H., Krausmann, F., 2007. *Human appropriation of net primary production (HANPP)*. International Society for Ecological Economics. Internet Encyclopedia of Ecological Economics
- Hérodote (484-420 av. J.-C.). *L'enquête. Livres I à IV*. Editions Folio classique, 1985.
- Huang, Q., Chen, G.Q., Zhang, Y., Chen, B., Luan, S.J., 2005. *Exergy as a unified measure of water quality*. ScienceDirect. Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation 12 (2007) 663-672.
- Husson, O., 2012. *Potentiel redox (Eh) et pH : Un cadre global de fonctionnement des systèmes sol/eau/plantes/microorganismes ?* Cirad UR SIA, Séminaire du 10 janvier 2012 - Agropolis.
- Hutchinson, G. E., 1944. *Problems of biogeochemistry, II. Introduction: the fundamental matter-energy difference between the living and inert natural bodies of the biosphere (W. L. Verdansky)*. Transactions of the Connecticut Academy of Arts and Sciences 35:483–517.
- Hutchinson, G.E., 1946. *Circular Causal Systems in Ecology*. Osborn Zoological Laboratory, Yale University, New Haven Connecticut. Annals of The New York Academy of Sciences, Vol. 50, 1948.
- Hutchinson, G.E., 1970. *The biosphere*. Sci Am 223(3):45-53  
<http://web.gps.caltech.edu/classes/ge148c/pdf%20files/hutchison.pdf>
- Hutchinson, G.E., 1971. *Bibliography of G. Evelyn Hutchinson*.
- IPCC *Assessment Reports* : 1995, 2001, 2007, 2013 ([http://www.ipcc.ch/publications\\_and\\_data/](http://www.ipcc.ch/publications_and_data/))
- Jakobson, R., 1971. *Selected writings. II. Word and language*. Ed. Stephen Rudy. The Hague, Paris.
- Jorge, L.H., Bakshi, B.R., 2005. *Expanding Exergy Analysis to Account for Ecosystem Products and Services*. Department of Chemical Engineering, The Ohio State University, 140 West 19th avenue, Columbus, USA.
- Jørgensen S.E., Mejer H.F., 1977. *Ecological buffer capacity*. Ecological Modelling, 3, 39– 61.
- Jørgensen, S.E., Odum H.T., Brown M.T., 2004. *Emergy end exergy stored in genetic information*. Ecological Modelling 178 (2004) 11-16.
- Jørgensen, S.E., et autres, 2004. *Calculations of exergy for organisms*. Ecological Modelling 185 (2005) 165-175.
- Jørgensen, S.E., 2006. *An Integrated Ecosystem Theory*. Copenhagen University, Institute A, Environmental Chemistry, University Park 2, 2100 Copenhagen. Ann. – Eur. Acad. Sci. (2006-2007).
- Jørgensen, S.E., et autres, 2007. *A New Ecology. Systems Perspective*. ELSEVIER, 2007.
- Kleidon, A., 2004. *Entropy Production by Earth System Processes* in : Kleidon, A. and Lorenz, R. D. (eds.) *Non-equilibrium thermodynamics and the production of entropy : life, Earth, and beyond*. Springer Verlag.
- Kleidon, A., 2007. *Thermodynamics and environmental constraints make the biosphere predictable* Max-Planck-Institut für Biogeochemie. Postfach 10 01 64, 07701, Jena, Germany.
- Konashev, K., 2006. *The evolutionary synthesis and Th. Dobzhpansky*. The Global and the Local : The History of Science and the Cultural Integration of Europe. Proceedings of the 2<sup>nd</sup> ICESHS (Cracow, Poland, September 6-9, 2006).
- Kuznetsov, O.L., Bolshakov, B.E., 2013. *Russian Cosmism, Global Crisis, Sustainable Development*. International university of nature, society and man. Dubna, Russia.
- Leach, G., & Slessor, M., 1973. *Energy equivalents of network inputs to food producing processes*. University of Strathclyde, Glasgow.
- Leach, G., 1975. *Energy and food production*, IPC Science and Technology Press, Guildford.

- Le Chatelier, H., 1884. *Sur un énoncé général des lois des équilibres chimiques*. Comptes rendus hebdomadaires des séances de l'Académie des sciences. 1884.
- Lenzen, M., 2001. *A generalised input-output multiplier calculus for Australia*. Economic Systems Research 13, 65–92.
- Lenzen, M., Murray, S.A., 2001. *A modified ecological footprint method and its application to Australia*. Ecological Economics 37, 229–255.
- Lenzen, M., Murray, S.A., 2003. *The Ecological Footprint—Issues and Trends*. ISA Research Paper 01-03. The University of Sydney.
- Lenzen, M., Wackernagel, M., Lauck, B., Wermer, P., 2005. *The Ecological Footprint of the State of Victoria*. University of Sydney, Global Footprint Network and Environment Protection Authority, Victoria. <http://www.epa.vic.gov.au/eco-footprint>.
- Leontief, W., 1973. *Essais d'économiques*. Editions Calmann-Lévy
- Levallois, C., 2010. *Can de-growth be considered a policy option? A historical note on Nicholas Georgescu-Roegen and the Club of Rome*. Rotterdam School of Management & Erasmus Studio, Erasmus University, Room T10-16, Burg. Oudlaan 50, 3062 PA Rotterdam, The Netherland. Ecological Economics 69 (2010) 2271-2278
- Levit, G.S., Hossfeld, U., Olsson, L., 2004. *The integration of Darwinism and Evolutionary Morphology : Alexej Nikolajevich Sewertzoff (1866-1936), and the Developmental Basis of Evolutionary Change*. Journal of experimental zoology (Mol Dev Evol) 302B:343-354(2004).
- Levit, G.S., Hossfeld, U., Olsson, L., 2006. *From the “Modern Synthesis” to Cybernetics: Ivan Ivanovich Schmalhausen (1884–1963) and his Research Program for a Synthesis of Evolutionary and Developmental Biology*. Journal of experimental zoology (Mol Dev Evol) 306B:89–106 (2006).
- Levit, G.S., 2007a. *The roots of Evo-Devo in Russia : Is there a characteristic « Russian Tradition » ?* Theory Biosci. DOI 10.1007/s12064-007-0013-9.
- Levit, G.S., 2007b. *Ecology revisited : Reflecting on Concepts*, Advancing Science. Chapter 24 : *Looking at Russian Ecology Through the Biosphere Theory*. DOI 10.1007./978-481-9744-6\_24.
- Lhuillier, C., Rous, J., 1998. *Introduction à la thermodynamique : cours et problèmes résolus*. Dunod, 1998.
- Liebig, J. von, 1862. *Les lois naturelles de l'agriculture*. Librairie agricole de la maison rustique, Paris.
- Loiret, R., 1983a. *Le projet Urania. Vers une filière agro-énergétique globale*. Rapport interne. INRA, LECSA, Montpellier.
- Loiret, R., 1983b. *Etude de faisabilité du projet « Hauts Cantons »*. Rapport interne. INRA, LECSA, Montpellier.
- Loiret, R., 1994. *Effet de serre et Changement climatique. Taxation et droits d'émission CO<sub>2</sub> : Financer le développement durable*. Mémoire de Master, Unice & Europlan : Bureau d'Assistance Technique, DGXI Energie, Commission européenne.
- Loiret, R., 1999. *Un essai de bio-démocratie. Pour une nouvelle logique du vivant*. Inachevé, non publié.
- Loiret, R., 2007. *Développement durable et/ou Ecodéveloppement ? Vers une nouvelle économie des ressources*. Rapport interne Agence Régionale pour l'Environnement Provence-Alpes-Côte d'Azur.
- Loiret, R., 2008. *Vers une nouvelle économie des ressources. Un programme interrégional pilote initié par la Région Paca ?* Rapport interne. Région Provence-Alpes-Côte d'Azur & Agence Régionale pour l'Environnement Provence-Alpes-Côte d'Azur.
- Loiret, R., 2011b. Programme EMPR-PNRs. Empreinte écologique et indicateurs phares pour les Parcs naturels Régionaux. Rapport n°1 (méthodologie). *Première application intégrale de la méthodologie « REAP »* (cf Wiedmann & Barrett, 2005) à l'empreinte carbone des collectivités françaises.
- Loiret, R., 2011c. Programme EMPR-PNRs. Empreinte écologique et indicateurs phares pour les Parcs naturels Régionaux. Rapport n°2 : *Empreinte carbone et empreinte écologique des collectivités adhérentes du Syndicat Mixte de Préfiguration du Parc Naturel Régional des Préalpes d'Azur*.
- Loiret, R., 2011d. Programme EMPR-PNRs. Empreinte écologique et indicateurs phares pour les Parcs naturels Régionaux. Rapport n°3 : *D'un constat des limites actuelles de l'Empreinte Ecologique à son évolution recherchée : Pour une prise en compte de la « biodiversité » des espaces naturels, et pour son intégration dans les cadres statistiques internationaux*.
- Loiret, R., 2012a. Cahier de recherche n°1 : *Rendre compte de la biodiversité dans le Bilan des relations homme-nature. Partie I : La « Biosphère » selon Vernadsky*. Contradiction du principe de Carnot.

- Référence Centre international REEDS (www.reeds.uvsq) : Cahier REEDS (CR) No. 2012-04.  
**Téléchargement direct** : <http://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00911684>
- Loiret, R., 2012b. Des comptes écologiques de la France aux comptes écologiques des collectivités territoriales : *Une application française de la méthodologie « REAP » du Stockholm Environment Institute (SEI)*. Référence Centre international REEDS (www.reeds.uvsq) : Cahier REEDS (CR) No. 2012-03.  
**Téléchargement direct** : <http://hal.archives-ouvertes.fr/hal-009116878>
- Loiret, R., 2013a. Cahier de recherche n°2 : Rendre compte de la biodiversité dans le Bilan des relations homme-nature. *Partie 2 : L'Indice Ka de Distance à l'équilibre & La Diversité Biologique*. Référence Centre international REEDS (www.reeds.uvsq) : Cahier REEDS (CR) No. 2013-04.  
**Téléchargement direct** : <http://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01025400>
- Lotka, A. J., 1921. *Note on the economic conversion factors of Energy*. Papers from the Department of Biometry and Vital Statistics, School of Hygiene and Public Health, Johns Hopkins University, No 40.
- Lotka, A. J., 1922a. *Contribution to the energetics of evolution*. School of hygiene and public health, Johns Hopkins University, No 60.
- Lotka, A. J., 1922b. *Natural selection as a physical principle*. School of hygiene and public health, Johns Hopkins University, No 60.
- Lotka, A. J., 1925. *Elements of physical biology*. Williams & Wilkins, Baltimore.
- Lovelock, J., Margulis, L., 1973. *Atmospheric homeostasis by and for the biosphere : The Gaia hypothesis*. *Tellus*, XXVI, 1974, 1-2.
- Lovelock, J., 1979. *La terre est un être vivant. L'hypothèse Gaïa*. Ed Champs sciences - Flammarion, Paris, 1993
- Lussato, B., 1977. *Introduction critique aux théories d'organisation*. Ed Dunod, Paris.
- Lussato, B., Messadié, G., 1986. *Bouillon de culture*. Edition Robert Laffont, Paris, 1986.
- Lussato, B., 1987. *Cours intégral de la Chaire de « Théories et systèmes d'organisation »*, CNAM, Paris. Copie personnelle.
- Lynn White Jr., 1967. *The Historical Roots of Our Ecologic Crisis*. *Science*, New Series, Vol. 155, No. 3767. American Association for the Advancement of Science. <http://www.jstor.org/stable/1720120>
- Marcon, E., 2011. *Mesures de la biodiversité*. Unité mixte de recherche : Ecologie des forêts de Guyanne.
- Margulis, L., Sagan, D., 1986. *L'univers bactériel*. Edition Albin Michel, Paris, 2002.
- Martin, A., 2009. *Recyclage du carbone et formation du diamant en zone de subduction : contraintes expérimentales*. Petrography. Université blaise pascal - Clermont-Ferrand II.
- Martínez-Alier, J., & Naredo, J.M., 1982. *A Marxist precursor of energy economics : Podolsky*. *The Journal of Peasant Studies*, Volume 9, Issue 2, 1982.
- Martinez-Alier, J., 1987. *Ecological economics*. Oxford, UK: Basil Blackwell.
- Martinez-Alier, J., 2003. *Marxism, Social Metabolism, and Ecologically Unequal Exchange*. *Lund University, World Systems Theory and the Environment*, 19-22 Sept. 2003.
- Marx, K., 1861-1863. *Théories sur la plus-value (Livre IV du Capital)*. Publiées sous la responsabilité de Gilbert Badia. Tome premier (Chapitres I à VII). Editions sociales, Paris Xe (pas de date).
- Marx, 1867. *Le Capital, Livre I*. Editions Garnier-Flammarion, Paris, 1969.
- Marx, K., et Engels, F., 1873-1883. *Lettres sur les sciences de la nature*. Editions Sociales, 1974.
- Marx, K., et Engels, F., 1875. *Critique des programmes de Gotha et d'Erfurt (1875)*. [http://classiques.uqac.ca/classiques/Engels\\_Marx/critique\\_prog\\_gotha/programme\\_gotha.pdf](http://classiques.uqac.ca/classiques/Engels_Marx/critique_prog_gotha/programme_gotha.pdf)
- Matarasso, P., 1990. *Représentation, modélisation, développement*. Actes de l'atelier de « Recherche opérationnelle » et développement. Montpellier, 1-19 janvier 1990. Organisé dans le cadre d'Agropolis et du GIS.
- McDonald, G., 2005. *Integrating Economics and Ecology: A Systems Approach to Sustainability in the Auckland Region*. Thesis, Massey University, Palmerston North, New Zealand.
- McDonald, G., 2010. *A didactic Input-Output model for Territorial Ecology Analyses*. Cahiers REEDS : CR No. 2010-13/A, UVSQ.
- McDonald, G., Patterson, M.G, 2003. *Ecological Footprints of New Zealand and its Regions*. Environmental Reporting - Technical Paper. Ministry for the Environment, New Zealand.

- McDonald, G., Patterson, M.G., 2004. *Ecological Footprints and Interdependencies of New Zealand Regions*. Ecological Economics, 50: 49-67.
- McDonald, G., Patterson, M.G., 2006. *Development of a New Zealand Physical Input-Output Table*. Market Economics Ltd, Auckland & New Zealand centre for Ecological Economics, Palmerston North, New Zealand.
- Meadows, D. H., et al., 1972. *The Limits to Growth*. Universe Book, London Earth Island, New York.
- MEDAT (Ifen), 2010. *Une expertise de l'Empreinte Ecologique*. République Française. Ministère de l'Ecologie, de l'Energie, du Développement Durable et de l'Aménagement du territoire. Etudes et documents du Commissariat Général au Développement Durable, n°16 janvier 2010.
- Mellender de Araujo, A., 2004. *Spreading the evolutionary synthesis : Theodosius Dobzhansky and genetics in Brazil*. Genetics and Molecular Biology, 27, 3 467-475 (2004).
- Messod, et Sabbah, R., 2000. *Les secrets de l'Exode*. Ed. Jean-Cyrille Godefroy. Paris
- Mirowski, P., 1989. *More Heat than Light – Economics as Social Physics, Physics as Nature's Economics* (pgs. 267-28). Cambridge: Cambridge University Press.
- Mission DAR, 2005. Agroforesterie recherche développement. Rapport R 6.3 – *Synthèse sur la diversité de la pédofaune en système agroforestier*.
- Morin, E., 1977. *La méthode. La Nature de la Nature*. Editions du Seuil, 1977.
- Morin, E., 2011. *La Voie. Pour l'avenir de l'humanité*. Ed. Fayard, Paris.
- Mueller, D.B., 2006. *International Trade from a Societal Metabolism Perspective*. Center for Industrial Ecology. School of Forestry and Environmental Studies. Yale University, 205 Prospect Street, New Haven.
- Nagendra, H., 2000. *Opposite trends in response for the Shannon and Simpson indices of landscape diversity*. Applied Geography 22 (2002) 175–186, Pergamon. [www.elsevier.com/locate/apgeog](http://www.elsevier.com/locate/apgeog).
- O'Connor, M., 1993. *Entropic irreversibility and uncontrolled technological change in economy and environment*. J. Evol Econ (1993) 3 :285-315.
- O'Connor, M., 1994a. *Thermodynamique, complexité et codépendance écologique : la science de la joie et du deuil*. Revue internationale de systémique. Vol. 8, N° 4-5, 1994 pp. 397-423.
- O'Connor, M., 1994b. *Economics and thermodynamics : New perspectives an Economic Analysis, 8 - Entropy, liberty and catastrophe : The physics and metaphysics of waste disposal*. Kluwer Academic Publishers, Boston/Dordrecht/London.
- Odum, H.T., 1971. *Environment, power and society*. Wiley, New York.
- Odum HT. 1983. *System Ecology : An Introduction*. Wiley, New York, NY.
- Odum, H.T., Brown, M.T., Christianson, R.A., 1986. *Energy Systems, Overview of the Amazon Basin*. Center for wetlands, University of Florida, Gainesville, FI, 32611.
- Odum, H.T., Arding, J.E., 1991. *Emergy analysis of shrimp mariculture in Ecuador*. Working paper. Center for wetlands, University of Florida, Gainesville, FI, 32611.
- Odum, H.T., 1996. *Environmental Accounting, Emergy and Decision Making*. J. Wiley, NY.
- Odum, H.T., 2000. *Energy, Hierarchy and Money*. Environmental Engineering Sciences. University of Florida, Gainesville, FL.
- Olson, L., Levit, S., Hobfeld, U., 2010. *Evolutionary developmental biology : its concepts and history with a focus on Russian and German contributions*. Naturwissenschaften (2010) 97:951-969. DOI 10.1007.
- ONU, 1983. *Concepts et méthodes d'établissement des statistiques de l'énergie et notamment des comptes et bilans énergétiques*. Département des affaires économiques et sociales internationales. Etudes méthodologiques. Série F, n°29.
- ONU, 2003. *Handbook of National Accounting. Integrated Environmental and Economic Accounting*. SEEA, 2003. United Nations-European Commission-International Monetary Fund-Organisation for Economic Cooperation and Development-World Bank.
- Passet, R., 1979. *L'économie et le vivant*. Petite bibliothèque Payot, Paris.
- Patterson, M.G., McDonald G.W., 1996. *Regional land environmental accounting systems in New Zealand, using input-output methodologies*. In: Tracking Progress: Linking environment and economy through indicators and accounting systems, Australia Academy Science. Sydney: University of New South Wales.

- Patterson, M., 1997. *Commensuration and theories of value in ecological economics*. Ecological Economics 25 (1998) 105–125.
- Pellegrini, L., 2012. *Joan Martínez-Alier Interviewed by Lorenzo Pellegrini*.
- Pierre, J.S., 1996. *Lotka contre Fisher. Combat de géants, dialogue de sourds ou parabole des aveugles ?* UMR 6552 EVE, Université de Rennes1 – CNRS. <http://perso.univ-rennes1.fr/jean-sebastien.pierre/cours/Lotka%20contre%20Fisher.pdf>
- Pimentel, D. et autres, 1973. *Food production and the energy crisis*, Science, 182: 443-9, 1973.
- Pimentel, D., 1979. *Energy and Agriculture*. In Food, Climate and Man. John Wiley & Sons, Toronto, 1979.
- Pimentel, D., 1980. *Handbook of Energy Utilization in Agriculture*. CRC Press.
- Podolinsky, S., 1880. *Le Socialisme et l'unité des forces physiques*. La revue socialiste, n°8 du 20 juin 1880, Montpellier.
- Polunin, N., Grinevald, J., 1988. *Vernadsky and Biospherical Ecology*. Paper presented in the Kiev Session on « Vernadsky's Theory of Biosphere and Problems of Environmental Protection » of the International Symposium for the Commemoration of the 125th Birthday Anniversary of V.I. Vernadsky.
- Pouvreau, D., 2013. *Une histoire de la "systémologie générale" de Ludwig von Bertalanffy - Généalogie, genèse, actualisation et postérité d'un projet herméneutique*. History, Philosophy and Sociology of Sciences. Ecole des Hautes Etudes en Sciences Sociales (EHESS), 2013. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00804157v2>
- Prigogine, I., Wiame, J.-M., 1946. *Biologie et thermodynamique des phénomènes irréversibles*. Experientia. 1946, 2, 451-453.
- Prigogine, I., 1968. *Introduction à la thermodynamique des processus irréversibles*. Editions J. Gabay, Paris, 1996.
- Prigogine, I., Stengers I., 1979. *La nouvelle alliance*. Editions Gallimard, Paris.
- Prigogine, I., 1993. *Les lois du chaos*. Editions Flammarion, 1994.
- Raharinirina, B.V., 2009. *Valorisation économique de la biodiversité par les contrats de bioprospection et la filière huiles essentielles : Le cas de Madagascar*. Thèse de doctorat de l'Université de Versailles Saint-Quentin-en-Yvelines (UVSQ).
- Raine, A., Foster, J., Potts, J., 2007. *The new entropy law and the economic process*. School of Economics. University of Queensland, Brisbane 4072, Australia.
- Reboul, C., 1977. *Déterminants sociaux de la fertilité des sols*. Station d'économie et de sociologie rurales, INRA, Paris. Actes de la recherche en sciences sociales, Année 1977, Volume 17, numéro 1.
- Reboul, C., 1987. *Monsieur le Capital et Madame la Terre. Fertilité agronomique et fertilité économique*. Co-édition edi-INRA, Paris, 1989.
- Rees, W.E., 1992. *Ecological footprints and appropriated carrying capacity: what urban economics leaves out*. Environment and Urbanization 1992; 4; 121.
- Ricardo, D., 1817. *Des principes de l'économie politique et de l'impôt*. A Paris, chez J.P. Aillaud.
- Risoud, B., Chopinet, B., 1999. *Efficacité énergétique et diversité des systèmes de production agricole - Application à des exploitations bourguignonnes*. Ingénieries - E A T, 1999, pp. 17-25. <hal-00463540>.
- Rivalland, V., 2003. *Amélioration et validation du modèle de fonctionnement de la végétation ISBA-A-g : Stress hydrique et flux de CO<sub>2</sub>*. Thèse de doctorat (Spécialité : Interaction, Végétation, Atmosphère) de l'Université de Toulouse III (Paul Sabatier).
- Rodríguez de Austria Giménez de Aragón, A.M., 2014. *Economía y naturaleza en Marx: el "asunto Podolinsky" como prueba de un divorcio inexistente*. Universidad de Sevilla.
- Sachs, I., 1979. *Stratégies de l'Écodéveloppement*. Editions Economie et Humanisme. Les éditions ouvrières.
- Sachs, I., 2007. *La troisième rive. A la recherche de l'écodéveloppement*. Bourin éditeur, Paris, 2007.
- Sazdjian, H., 2005. *Physique statistique et Thermodynamique*. Université Paris XI, Orsay.
- Shannon, C. E., 1948. *A mathematical theory of communication*.
- Sheldrake, R., 1981. *Une nouvelle science de la vie*. Editions du Rocher, Paris, 1985.
- Schilizzi, S., 1982. *Energie de biomasse et production alimentaire. Conflits et complémentarités*. Mémoire pour le D.E.A d'Economie, sous la direction d'Ignacy Sachs. EHESS. Paris.
- Schilizzi, S., 1983. *Contributions de l'analyse énergétique à l'étude des systèmes de production agricole*. LECSA-INRA-SAD, Montpellier.

- Schilizzi, S., 1987. *L'énergie dans les systèmes de production agricole*. Thèse pour le doctorat de l'EHESS. Directeur de thèse Ignacy Sachs. EHESS. Paris.
- Schrödinger, E., 1944. *Qu'est-ce que la vie ?* Collection Points-Sciences. Editions du Seuil, Paris, 1993.
- Schrödinger, E., 1951. *Physique quantique et représentation du monde*. Editions du Seuil, Paris, 1992.
- Schultz, J., York, R., 2011. *Recognizing Overshoot : Succession of an Ecological Framework*. Department of Sociology, University of Oregon.
- Sewertzoff, A.N. 1928. *Directions of Evolution*. Acta Zoologica 1928, Bd IX.
- Sewertzoff, A.N. 1930. *Théorie de l'Aromorphose*. Sources indirectes, dont Zotin, 1978, 1984.
- Siche, J.R., Agostinho, F., Ortega, E., 2007. *Emergy Net Primary Production (ENPP) as Basis for Calculation of Ecological Footprint*. In Proceedings of the International Ecological Footprint Conference, Cardiff, Wales, UK, 8–10 May 2007; BRASS Research Centre, Cardiff University: Wales, UK, 2007.
- Sigaut, F., 1975. *L'agriculture et le feu. Rôle et place du feu dans les techniques de préparation du champ de l'ancienne agriculture européenne*. Editions Mouton & Co, Paris.
- Silow, E.A., Mokry, A.V., 2009. *Exergy as a Tool for Ecosystems Health Assessment*. Entropy 2010, 12, 902-925.
- Silow, E.A., Mokry, A.V., Jørgensen, S.E., 2011. *Eco-Exergy use for Ecosystems Health Assessment*. International Journey of Exergy 17th June 2011. Paris Ouest University.
- Slobodkin, L.B., 1993. *An appreciation : George Evelyn Hutchinson*. Journal of Animal Ecology, Vol.62, N°2, 1993, pp. 390-394.
- Soltner, D., 1978. *Alimentation des animaux domestiques*. Annexe : Tables de rationnement. Collection Sciences et techniques agricoles.
- Soltner, D., 1979. *Les grandes productions végétales*. Collection Sciences et techniques agricoles.
- Sukachev, V.N., Dylis, N., 1964. *Fundamentals of Forest Biogeocoenology*. Translation from the Russian. Olivier & Boyd. Edinburgh & London, UK.
- Szargut, J., Valero, A., Stanek, W., Valero Delgado, A., 2005. *Towards an International Reference Environment of Chemical Exergy*.
- Tilley, D.R., 2004. *Howard T. Odum's contribution to the laws of energy*. Ecological Modelling 178 (2004) 121-125.
- UN, 2012. *System of Environmental-Economic Accounting. Central Framework*.  
<https://unstats.un.org/unsd/envaccounting/seea.asp>
- Vackar, D., 2008. *The Ecological Footprint and Biodiversity*. Charles University in Prague, Environment Centre, Prague, Czech Republic.
- Valero Delgado, A., 2008. Thesis : *Exergy evolution of the mineral capital on Earth*. Department of Mechanical Engineering. Centro Politécnico Superior. University of Zaragoza.
- Valette, F., 1980. *Simulation et optimisation de systèmes intégrés à énergie totale (modèle SOSIE)*. CNRS-PIRDES (PIRSEM).
- Venetoulis, J., Talberth J., 2006. *Refining the ecological footprint*. Environ Dev Sustain DOI 10.1007/s10668-006-9074-z
- Verleyen, S., 2007. *Jakobson et Troubetzky face à Martinet*. Cahiers Ferdinand de Saussure 60, 2007, p.170.
- Vernadsky, *Biographie* : Voir Bailes (1990).
- Vernadsky, W., 1922. *La composition chimique de la matière vivante et la chimie de l'écorce terrestre*. Article disponible à : <http://vernadsky.fr/documents.html>
- Vernadsky, W., 1924a. *La matière vivante et la chimie de la mer*. Article disponible à : <http://vernadsky.fr/documents.html>
- Vernadsky, W., 1924b. *La Géochimie. Recueil de conférences faites à la Sorbonne en 1922-1923*. Ouvrage en français. Publication Librairie Félix Alcan à Paris.
- Vernadsky, W., 1929. *La biosphère*. Editions du Seuil, Paris, 2002.
- Vernadsky, W., 1930. *L'étude de la vie et la nouvelle physique*. Conférence faite à la société des naturalistes de Moscou et de Leningrad. Article disponible à : <http://vernadsky.fr/documents.html>
- Vernadsky, W., 1931. *Sur les conditions de l'apparition de la vie sur la terre*. Conférence faite à la société des naturalistes de Leningrad. Texte disponible à : <http://vernadsky.fr/documents.html>

- Vernadsky, W., 1932. *L'autotrophie de l'humanité*. Article disponible à : <http://vernadsky.fr/documents.html>
- Vernadsky, W., 1936. *On Some Fundamental Problems of Biogeochemistry*. 21st Century Winter 2005–2006. <https://www.21stcenturysciencetech.com/>
- Vernadsky, W., 1938. *Problems of Biogeochemistry II. On the Fundamental Material-Energetic Distinction Between Living and Nonliving Natural Bodies of The Biosphere*. 21st Century Winter 2000–2001 [https://www.21stcenturysciencetech.com/Articles%202005/Vernadsky\\_W00-01.pdf](https://www.21stcenturysciencetech.com/Articles%202005/Vernadsky_W00-01.pdf)
- Vernadsky, W., 1944. *La Biosphère et la Noosphère*. Article publié dans American Scientist en 1945.
- Vernadsky, W., 1998. *The Biosphere*, Far West Institute edition, USA.
- Vernant, J. P., 1974. *Mythe et pensée chez les Grecs*. Tomes I et II. Editions Maspero. Paris.
- Von Bertalanffy, L., 1968. *Théorie générale des systèmes*. Editions Dunod, Paris, 1973.
- Wackernagel, M., 1994. Thesis. *Ecological Footprint and Appropriated Carrying Capacity : A tool for planning toward sustainability*. The University of British Columbia.
- Waksman, S., 1936. *L'Humus. Origine, composition chimique et importance dans la nature*. The Williams & Wilkins company. Baltimore. Nous devons notre exemplaire en français de la photocopie exhaustive d'une traduction dactylographiée non éditée de l'ouvrage en Anglais, exécutée en 1937 par un chercheur de l'INRA d'Antibes, Guy Lefevre. Le document se trouve dans la bibliothèque de l'INRA d'Antibes.
- Wall, G., 1977. *Exergy - A useful concept within resource accounting*. Report no. 77-42, Institute of Theoretical Physics, Chalmers University of Technology and University of Göteborg, S-412 96 Göteborg, Sweden
- Werth, N., 2007. Russie : *Il y a 90 ans, février-mars 1917. Une révolution oubliée*. Document internet. ([http://alencontre.org/archives/Ecran/RevoRusseWerth03\\_07.html#x](http://alencontre.org/archives/Ecran/RevoRusseWerth03_07.html#x))
- Werth, N., 2011. *La tragédie des cinq épis*. Hebdomadaire Marianne, 30 juillet au 5 août 2011.
- Wiedmann, T., Barret, J., 2005. *The use of input-output analysis in REAP to allocate ecological footprints and material flows to final consumption categories*. Stockholm Environment Institute, University of York.
- Wiedmann, T., Barrett, J., 2010. *A Review of the Ecological Footprint Indicator. Perceptions and Methods*. Centre for Sustainability Accounting, Innovation Centre, York Science Park, York, YO10 5DG, UK.
- Wiedmann, T., Minx, J., Barrett, J., Wackernagel, M., 2006. *Allocating ecological footprints to final consumption categories with input-output analysis*. *Ecological Economics* 56, 28–48.
- WWF, 2002-2011. Living Planet report. *L'Empreinte écologique des nations*.
- Zahnle, K., Schaefer, L., Fegley, B., 2010. *Earth's Earliest Atmospheres*. Cold Spring Harbor Perspectives in Biology. Cshperspectives.cshlp.org.
- Zotin, A.I., Lamprecht, I., 1978. *Thermodynamics of Biological process*. Editions Walter de Gruyter, 1978, pp. 19-30, 85-98, 115-134, 191-196, 301-304, 341-348.
- Zotin, A. I., 1984 *Bioenergetic trends of evolutionary progress of organisms*. In Thermodynamics and Regulation of Biological processes; Walter de Gruyter: Berlin, New York, 1984.

## Liste des sigles et abréviations

AHL	Les 3 compartiments de l'Ecosphère et de la Biosphère	EPCI	Etablissement Public de Coopération Intercommunale
ARPE	Agence Régionale Pour l'Environnement de PACA	GIEC	Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat
Be	Bilan écologique	GFN	Global Footprint Network
BMC	Biotic Matter Cycle	Gha	Global hectare (GFN)
CBD	Convention on Biological Diversity	GPL	Exergie des matières organiques principalement constituées de Glucides, Lipides et Protides
CCNUCC	Convention Cadre des Nations Unies sur le Changement Climatique	GPP	Gross Primary Productivity
CHL	Exergie des matière principalement constituées de Cellulose, Hémicellulose et Lignine	Idd	Indicateurs de développement durable
CLC	Corine Land Cover	IDé	Indice d'écodéveloppement ou de développement écologique
CNUED	Conférence des Nations Unies pour l'Environnement et le Développement	IOA	Input/Output Analysis
COICOP	Classification Of Individual Consumption by Purpose - Nomenclature de consommation des ménages	ISEM	International Society of Ecological Modeling
CSP	Catégories socioprofessionnelles	IPCC	International Panel on Climate Change
D <sub>B</sub>	Diversité biologique	MFA	Material Flows Analysis
D <sub>EO</sub>	Distance à l'équilibre d'oxydation	NAAT	Nomenclature d'Affectation des Activités aux Territoires
D <sub>ER</sub>	Distance à l'équilibre de réduction	NPP	Net Primary Productivity
D <sub>ES</sub>	Distance à l'équilibre statistique (donnée par l'indice $K_a$ )	PIOT	Physical Input/Output Table
D <sub>ET</sub>	Distance à l'équilibre thermodynamique (composée de D <sub>ER</sub> et D <sub>EO</sub> )	PNRPA	Parc Naturel Régional des Préalpes d'Azur
D <sub>F</sub>	Diversité fonctionnelle	REAP	Ressources & Energy Analysis Program (SEI)
D <sub>S</sub>	Diversité structurale	SEEA	System of Environmental-Economic Accounting (UN)
DSe	Demande finale en surfaces économiques	Sej	Solar Equivalent Joule (ou EmJoule)
Ee /EF	Empreinte écologique / Ecological Footprint	SEI	Stockholm Environment Institute
EUNIS Habitat	Classification des habitats (European University Information Systems)	SUT	Supply & Use Table
EFA	Ecological Footprint Accounts	TES	Tableau Entrées/Sorties
GAEZ	Global Agro Ecological Zone (FAO)		

# Table des figures, tableaux et illustrations

Figure 1 : Nature naturelle et cadre de calcul de l'Empreinte écologique .....	38
Figure 2 : Les contradictions entre biocapacité (empreinte écologique) et biodiversité .....	43
Figure 3 : Cadre opérationnel du Bilan <i>écologique</i> des relations Homme-Nature.....	48
Tableau 1 (figure 4) : <i>Analyse énergétique</i> de la production agro-forestière française, selon Podolinsky (1880) .....	53
Tableau 2 (figure 5) : Comparaison de la <i>productivité énergétique</i> de l'agriculture française entre 1870 et 1970.....	55
Tableau 3 (figure 6) : Productivité énergétique de 12 exploitations bourguignonnes, 1999 .....	55
Figure 7.1 : Lettre de W. Vernadsky à Marie Curie, 1927, recto. ....	98
Figure 7.2 : Lettre de W. Vernadsky à Marie Curie, 1927, verso.....	99
Figure 8 : Lettre d'adieux de W. Vernadsky à Marie Curie, 1925.....	101
Figure 9 : L'entropie lors des changements d'état de l'eau.....	106
Figure 10 : Bilan radiatif de la Terre, en W/m <sup>2</sup> .....	108
Figure 11 : Biosphère et Géosphère, ou Biogéosphère.....	114
Figure 12 : Biosphère et Ecosphère en expansion, selon Vernadsky .....	114
Figure 13 : Les deux principes biogéochimiques et la différenciation Biosphère/Ecosphère .....	119
Figure 14 : Cycles biogéochimiques d'accumulation primitive de l'énergie .....	121
Figure 15 : Ecosystème microbien hypersalin (bio-film) illustrant l'évolution primitive de la Biosphère .....	122
Figure 16 : Modèle généralisé des transformations biogéochimiques de la Biosphère .....	123
Figure 17 : Fonction redox d'une cellule d'eucaryote autotrophe.....	124
Figure 18 : Eléments de modélisation du Biotic Matter Cycle (BMC).....	124
Figure 19 : Différentiel d'intensité énergétique et équilibre thermique.....	141
Figure 20 : Frontières thermiques et jet stream .....	142
Tableau 4 (figure 21) : Conservation de la masse et de l'énergie lors d'une réaction .....	144
Figure 22 : Différentiel de pression et équilibre mécanique à $pV$ constant.....	145
Tableau 5 (figure 23) : Réduction photosynthétique du CO <sub>2</sub> et de H <sub>2</sub> O.....	154
Figure 24 : Illustration de l'entropie statistique $H'$ , selon Shannon.....	159
Figure 25 : Contradiction entre (éco)exergie et indice de Shannon.....	174
Tableau 6 (figure 26) : $\beta$ -values comme facteurs de conversion de l'exergie .....	188
Figure 27 : Synthèse des relations entre fonctions et variables d'état.....	191
Figure 28 : Représentation thermodynamique des relations économie-nature.....	192
Tableau 7 (figure 29) : Stoechiométrie du glucose & $d(pV)$ .....	195
Tableau 8 (figure 30) : Exemple de variation de l'indice D de Simpson.....	203
Figure 31 : Représentation simplifiée des diversités $\alpha$ , $\gamma$ et $\beta$ .....	205
Figure 32 : Illustration des variations de l'indice $K_a$ .....	216
Figure 33 : Illustration des variations de l'entropie de Shannon .....	216
Figure 34 : Représentation 2D et calcul de l'équilibre statistique $1/n$ .....	217
Figure 35 : Représentation 2D et calcul de l'indice $K_a$ d'une diversité structurale $\beta$ .....	217
Tableau 9 (figure 36) : Détails de calcul, et variations de l'indice $K_a$ .....	218
Figure 37 : Représentation de l'équilibre et d'une diversité $\beta$ en 3D.....	218
Tableau 10 (figure 38) : Indice $K_a$ et évolution de la diversité structurale d'une commune selon CLC.....	222
Tableau 11 (figure 39) : Indice $K_a$ et diversité structurale individuelle et globale des communes du PNRPA .....	223

Tableau 12 (figure 40) : Equations stœchiométriques de quelques molécules significatives des autotrophes .....	225
Tableau 13 (figure 41) : Calcul de l'indice $\bar{K}_a$ du glucose (masse des composants).....	227
Tableau 14 (figure 42) : Corrélation indice $\bar{K}_a$ et densité massique moléculaire .....	227
Figure 43 : Graph de tendance de l'indice $\bar{K}_a$ et de la densité moléculaire dans l'Ecosphère.....	227
Figure 44 : Molécule de Buckminsterfullerène ( $C_{60}$ ).....	228
Tableau 15 (figure 45) : Exergie et densité maximale des bois dans l'Ecosphère .....	228
Tableau 16 (figure 46) : Corrélation indice $\bar{K}_a$ /exergie de quelques composés de carbone organique.....	230
Figure 47 : Graph de tendance de l'exergie et de l'indice $\bar{K}_a$ tissulaire dans la Biosphère profonde.....	230
Figure 48 : Une évolution planétaire dirigée de la fossilisation du carbone organique .....	231
Figure 49 : La surface terrestre magmatique des origines.....	233
Figure 50 : Représentation de la Biosphère en expansion, depuis l'Archéen.....	236
Figure 51: représentation simplifiée du processus d'endosymbiose .....	239
Figure 52 : Zones d'interface de la Biosphère, favorables à l'émergence de l'Ecosphère.....	244
Figure 53 : Le protiste <i>Euglena</i> .....	244
Figure 54 : Coproduction redox de la distance à l'équilibre ( $pV$ ) des autotrophes.....	246
Tableau 17 (figure 55) : Stockage et utilisation de l'exergie dans un panel comparatif d'écosystèmes.....	247
Tableau 18 (figure 56) : Intensification énergétique (CHL) de quelques espèces forestières.....	247
Tableau 19 (figure 57) : Intensification énergétique (GPL) chez les autotrophes .....	248
Figure 58 : Intensification respiratoire des hétérotrophes au long de l'évolution.....	250
Tableau 20 (figure 59) : Intensification énergétique (GPL) chez les hétérotrophes .....	251
Figure 60 : fonction $d(pV)$ des cycles biogéochimiques et production de distance à l'équilibre .....	252
Figure 61 : $pV$ , $d(pV)$ et la production de distance à l'équilibre redox .....	253
Figure 62 : Les Gerris et la tension superficielle de l'eau.....	257
Tableau 21 (figure 63) : Données de l'écosystème de Mondego.....	266
Tableau 22 (figure 64) : Recomposition des facteurs $\beta$ et de l'éco-exergie des organismes de l'écosystème .....	267
Tableau 23 (figure 65) : Exergie-CHL et GPL des organismes .....	267
Tableau 24 (figure 66) : A - Eco-exergie (facteur $\beta$ ) des placettes de l'écosystème .....	268
Figure 67 : A - Variation de l'éco-exergie totale et massique (facteurs $\beta$ ) de l'écosystème.....	269
Tableau 25 (figure 68) : B - Exergie CHL-GPL des placettes de l'écosystème .....	270
Figure 69 : B - Variations de l'exergie totale et massique (CHL-GPL) de l'écosystème .....	271
Figure 70 : A - Variations de l'éco-exergie massique (facteur $\beta$ ) et de l'indice $\bar{K}_a$ des placettes .....	272
Figure 71 : B - Variations de l'exergie massique (CHL-GPL) et de l'indice $\bar{K}_a$ des placettes .....	273
Tableau 26 (figure 72) : Corrélation éco-exergie et exergie CHL-GPL .....	274
Tableau 27 (figure 73) : Exergie CHL (réduction) des placettes de l'écosystème .....	275
Figure 74 : Exergies totales et massiques, de réduction et d'oxydation, des placettes de l'écosystème.....	275
Tableau 28 (figure 75) : Synthèse de l'exergie CHL-GPL et $D_{ET}$ .....	276
Figure 76 : Distance totale et massique à l'équilibre thermodynamique ( $D_{ET}$ ) des placettes .....	277
Tableau 29 (figure 77) : Facteurs d'équivalence exprimés en $seJ/m^2$ .....	283
Tableau 30 (figure 78) : Quelques résultats anticipés de l' <b>Actif écologique</b> .....	283
Figure 79 : Périmètre du PNRPA .....	291
Figure 80 : Seuil de densité à 80 hab/km <sup>2</sup> . Evolution 1962-1999.....	292
Tableau 31 (figure 81) : Stocks de carbone et indices $\bar{K}_a$ redox du Territoire.....	305
Tableau 32 (figure 82) : Stocks d'exergie $pV$ et $D_{ET}$ du Territoire (année n) .....	306

Figure 83 : GPP et NPP d'un couvert végétal, quelques explications.....	308
Tableau 33 (figure 84) : NPP des espaces naturels du Territoire et référentiel.....	310
Tableau 34 (figure 85) : Stœchiométrie annuelle du Territoire - Synthèse .....	314
Tableau 35 (figure 86) : Actif écologique du Territoire - Synthèse .....	318
Figure 87 : Publication antérieure concernant le <b>Passif écologique</b> de la France .....	324
Tableau 36 (figure 88) : Les grandes catégories de l'Empreinte écologique.....	326
Tableau 37 (figure 89) : Le TES français (complet).....	330
Tableau 38 (figure 90) : Le TES complet réorganisé en SUT et ses égalités .....	330
Tableau 39 (figure 91) : Les deux sens de lecture du TES (complet) réorganisé en SUT .....	331
Tableau 40 (figure 92) : La NAAT 14.....	332
Tableau 41 (figure 93) : Détail de regroupement de la NAAT 14 .....	332
Tableau 42 (figure 94) : Détail de regroupement de la NAAT 14 .....	333
Tableau 43 (figure 95) : La nomenclature agrégée COICOP13 .....	337
Tableau 44 (figure 96) : Table de correspondance NAAT14 → COICOP13 .....	337
Tableau 45 (figure 97) : Affectation des dépenses agrégées COICOP13 aux CSP.....	338
Tableau 46 (figure 98) : Cadre synthétique de calcul du <b>Passif écologique</b> .....	338
Tableau 47 (figure 99) : TES monétaire (M€) complet de la France, agrégé à 14 postes NAAT (1999) .....	340
Tableau 48 (figure 100) : Annexe du TES14 <i>monétaire</i> : La consommation des ménages éclatée selon COICOP13...341	341
Tableau 49 (figure 101) : Données de référence du TES14 <i>biophysique</i> .....	342
Tableau 50 (figure 102) : TES14 <i>biophysique</i> complet de la France, ou <b>Passif écologique</b> .....	343
Tableau 51 (figure 103) : Annexe du TES14 <i>biophysique</i> (Passif écologique) : La consommation des ménages éclatée selon COICOP13 .....	344
Tableau 52 (figure 104) : TES 14 <i>monétaire</i> complet du Territoire.....	347
Tableau 53 (figure 105) : Annexe du TES14 <i>monétaire</i> territorial : La consommation des ménages éclatée selon COICOP13 .....	348
Tableau 54 (figure 106) : TES14 <i>biophysique</i> complet du Territoire, ou <b>Passif écologique</b> .....	349
Tableau 55 (figure 107) : Annexe du TES14 <i>biophysique</i> (Passif écologique du Territoire) : La consommation des ménages éclatée selon COICOP13.....	350
Tableau 56 (figure 108) : Passif <i>écologique</i> de la France, en Tep/habitant : A - Consommations intermédiaires.....	352
Tableau 57 (figure 109) : Passif <i>écologique</i> de la France, en Tep/habitant : B - Consommation des ménages .....	352
Tableau 58 (figure 110) : TES 14 monétaires et biophysiques - Quelques ratios d'intensité monnaie/exergie et exergie/monnaie .....	353
Tableau 59 (figure 111) : Demande en surfaces directes et indirectes, Indice d'autonomie territoriale.....	354
Tableau 60 (figure 112) : Bilan thermodynamique du Territoire urbain : A - Bilan fonctionnel.....	358
Tableau 61 (figure 113) : Bilan thermodynamique du Territoire urbain : B - Bilan stœchiométrique.....	361
Figure 114 : Cadre opérationnel de mesure du Bilan <i>écologique</i> .....	363
Tableau 62 (figure 115) : Système de coordonnées matricielles, cadre détaillé de calcul du <b>Bilan écologique</b> .....	365
Tableau 63 (figure 116) : <b>Bilan écologique</b> du Territoire (version A fonctionnelle) .....	366
Figure 117 : Comparaison des directionalités de l'actif et du passif écologiques .....	369
Figure 118 : Modélisation planétaire des masses de plancton .....	374
Figure 119 : Frontières thermiques et Jet Stream planétaires .....	375
Tableau 64 (figure 120) : Cadre de calcul déployé du Bilan écologique, version B (du Territoire).....	378
Tableau 65 (figure 121) : <b>Bilan écologique</b> du Territoire (version B, stœchiométrique) .....	380

## Sommaire détaillé

RESUME .....	4
ABSTRACT .....	4
MOTS-CLES.....	5
REMERCIEMENTS.....	6
SOMMAIRE SIMPLIFIE .....	7
INTRODUCTION GENERALE.....	10
A.    UNE INTERROGATION CENTRALE.....	11
B.    LE VRAI CHALLENGE . . .	14
C.    . . . ET SES ENJEUX .....	15
D.    PLAN DE THESE.....	16

---

### PREMIERE PARTIE : *Fondements du Bilan écologique, et problématique globale*

---

.CHAPITRE I. FONDEMENTS DU BILAN <i>ÉCOLOGIQUE</i> , ET PROBLÉMATIQUE GLOBALE ...	19
1.1    FONDEMENTS DU BILAN <i>ÉCOLOGIQUE</i> .....	20
1.1.1 <i>A la recherche de l'Écodéveloppement</i> .....	20
1.1.2 <i>De l'objectivation des relations homme-nature</i> .....	24
1.1.2.1    Un état de la question <i>introductif</i> .....	24
1.1.2.2    De la nature de la Nature, et de la valeur de son travail .....	24
a) <i>Cadre originel du débat</i> .....	24
b) <i>Translation du regard sur la Nature</i> .....	29
c) <i>Cadre actuel du débat</i> .....	30
1.1.3 <i>De la mesure du travail de la Nature</i> . . .	31
1.1.4 <i>... au bilan des relations Homme-Nature</i> .....	33
1.1.5 <i>L'Empreinte écologique : une faille récurrente</i> .....	34
1.1.5.1    Critique globale de l'Empreinte écologique .....	34
1.1.5.2    De l'ignorance de la vraie nature de la Nature . . .	36
1.1.5.3    . . . jusqu'au au Mur du vivant ! .....	40
1.1.5.4    Le « vrai » facteur limitant de la vie humaine.....	42
1.1.5.5    En contradiction finale avec la biodiversité .....	43
1.1.5.6    Difficultés de la déclinaison territoriale d'un concept mondialisé .....	44
1.1.6 <i>CBD, Biodiversité et Développement Sostenable</i> .....	45
1.1.7 <i>Les prémisses d'un Bilan écologique</i> .....	46
1.1.7.1    Le concept de <i>Bilan</i> appliqué à l'environnement.....	46
1.1.7.2    Un bilan <i>écologique</i> de l'économie industrielle ? .....	47
1.1.7.3    Assise conceptuelle et cadre opérationnel du Bilan <i>écologique</i> .....	47
1.2    UNE PROBLÉMATIQUE GLOBALE.....	49
1.2.1 <i>Mini panorama introductif à l'analyse énergétique</i> .....	49
1.2.2 <i>Le « Podolinsky Business »</i> .....	52
1.2.2.1    A - La Théorie de l'accumulation d'énergie .....	53
1.2.2.2    B - L'homme, <i>machine parfaite</i> de la production socialiste .....	56
1.2.3 <i>La critique d'Engels</i> .....	57
1.2.4 <i>L'accumulation énergétique face aux Lumières</i> .....	62
1.2.4.1    Partie A : Quid de l'accumulation énergétique ? .....	66
1.2.4.2    Partie B : Mesurer l'énergie biogéochimique du vivant .....	67

---

**DEUXIEME PARTIE : Recherche épistémologique et de nature fondamentale sur l'Actif écologique**


---

<b>.CHAPITRE II. L'ENERGIE DU VIVANT FACE AUX LUMIERES.....</b>	<b>69</b>
2.1  VERS UNE ENERGETIQUE DE LA NATURE (1914-1945).....	70
2.1.1  Un contexte de recherche très particulier.....	70
2.1.2  Lotka et le « Business » de l'énergétique.....	73
2.1.3  Vers une « direction » de l'évolution.....	79
2.1.4  Les « successions » vers le climax.....	82
2.1.5  Un courant russe de la « directionnalité ».....	83
2.1.5.1  De la force « vitale » à l'énergie biogéochimique.....	83
2.1.5.2  A.N. Sewertzoff et la théorie de l'aromorphose.....	87
2.1.5.3  L. Berg et la <i>nomogénèse</i> .....	90
2.1.5.4  V. Sukachov et les <i>biogécénoses</i> .....	92
2.1.6  L'exception de Vernadsky.....	93
2.1.6.1  Une révolution devance l'autre.....	93
2.1.6.2  La révolution sous silence !.....	102
2.1.6.3  Une contradiction formelle de la <i>Flèche du temps</i> .....	103
2.1.6.4  Quand Clausius interprète l'exception de Vernadsky.....	105
2.1.6.5  Principes fondamentaux de la Biosphère.....	112
2.1.6.6  Les <i>deux principes</i> de la biogéochimie.....	116
2.1.7  Cycle idéal de Carnot et accumulation énergétique.....	120
2.1.7.1  L'accumulation primitive du Capital, naturel : Cycles biotiques et fonctions redox originelles de la Biosphère.....	121
2.1.7.2  Cycles biotiques redox de l'Ecosphère (BMC) et systèmes « clos » d'accumulation énergétique.....	123
2.1.8  Conclusion : Vers un quatrième principe.....	126
2.1.8.1  L'accumulation énergétique vérifiée.....	126
2.1.8.2  Quid d'un quatrième principe ?.....	127
2.1.8.3  Sauf l'Anthrosphère !.....	130
2.1.8.4  Conclusion de la conclusion.....	135
2.2  ENERGIE, EXERGIE, DIVERSITE : RAPPEL DE QUELQUES NOTIONS FONDAMENTALES	137
2.2.1  Introduction.....	137
2.2.2  Eléments de thermodynamique classique.....	137
2.2.2.1  Principales variables d'état.....	138
2.2.2.2  Grandeurs extensives et grandeurs intensives.....	138
2.2.2.3  Division et conjugaison de grandeurs extensives et intensives.....	139
2.2.2.4  La conjugaison « $pV$ », variable d'état d'équilibre.....	139
2.2.2.5  Etats d'équilibre.....	139
(a) L'équilibre thermique, retour au concept d'entropie.....	140
(b) L'équilibre mécanique.....	143
(c) L'équilibre osmotique.....	145
(d) L'équilibre thermodynamique.....	146
2.2.2.6  Fonctions d'état, grands principes, petite introduction.....	146
2.2.2.7  Principe de conservation de la masse.....	147
2.2.2.8  Premier principe de la thermodynamique.....	148
Fonction d'état énergie interne (U) ou totale (E).....	148
Relations entre E et U, clarifications sur Q et W.....	148
Fonction d'état enthalpie (H).....	150
2.2.2.9  Second principe de la thermodynamique.....	150
Fonction d'état entropie (S).....	150
2.2.2.10  Extensions des deux premiers principes.....	151
Energie libre de Gibbs (G) ou enthalpie libre.....	151
Energie libre G et potentiel chimique $\mu$ .....	152
Exergie $E_x$ et énergie libre G.....	153
2.2.3  Approche statistique de la diversité.....	155
2.2.3.1  La diversité au sens statistique.....	155
2.2.3.2  Diversités $\alpha$ , $\gamma$ et $\beta$ .....	156
2.2.3.3  Décomposition des diversités $\alpha$ , $\gamma$ et $\beta$ .....	157
2.2.3.4  L'entropie de Shannon : la théorie de l'information pénètre l'écologie.....	157
2.2.3.5  L'indice de Simpson : une efficacité entropique mesurée entre 0 et 1.....	160
2.3  EXERGIE ET BIODIVERSITE : SOLUTIONS ET PROBLEMES D'AUJOURD'HUI.....	161
2.3.1  L'exergie versus les deux principes biogéochimiques.....	161
2.3.2  Quatrième principe et théorie de l'information.....	163
2.3.2.1  L'information comme fonction non hasardeuse du vivant.....	163
2.3.2.2  I.I. Schmalhausen et les champs d'information de l'Ecosphère.....	163
2.3.2.3  Une information du vivant propre à l'énergétique de l'évolution.....	164
2.3.2.4  Thermodynamique irréversible et théorie de l'information.....	165

2.3.3	<i>L'exergie versus l'énergie biogéochimique du vivant</i> .....	165
2.3.3.1	S. E. Jørgensen et l'éco-exergie .....	167
2.3.3.2	Une nouvelle Théorie des écosystèmes.....	169
2.4	<b>EXERGIE ET BIODIVERSITE : UNE PROBLEMATIQUE VITALE</b> .....	172
2.4.1	<i>Premier aspect : L'indice <math>H'</math> de Shannon et la mesure de la diversité</i> .....	172
2.4.1.1	Le constat de Jørgensen .....	172
2.4.1.2	Constat confirmé : L'indice $H'$ contredit la biodiversité.....	175
2.4.1.3	La théorie des écosystèmes remise en cause .....	176
2.4.1.4	L'entropie de Shannon face aux systèmes vivants .....	177
	<i>De la notion d'équilibre</i> .....	178
	<i>Postulat fondamental de la physique statistique</i> .....	178
	<i>Temps 1 : L'entropie de Shannon vérifie l'entropie de Boltzmann</i> .....	179
	<i>Temps 2 : L'entropie de Shannon contredit l'entropie de Boltzmann</i> .....	179
	<i>De l'inerte au vivant : un rapport à l'équilibre de sens contraire</i> .....	181
	<i>Quand le « non sens » de Shannon mesure la rareté !</i> .....	181
	<i>De la rareté à la biodiversité : Un glissement sémantique aux répercussions fondamentales</i> .....	182
2.4.1.5	Négentropie de l'information : La solution primitive de Bonsack .....	183
2.4.2	<i>Deuxième aspect : Les facteurs <math>\beta</math> et la mesure de la diversité biologique</i> .....	185
2.4.2.1	Mesure impossible de la pleine gamme de diversité biologique.....	185
2.4.2.2	Environnement de référence trop relatif .....	186
2.4.2.3	Mesure incomplète de la distance à l'équilibre du vivant .....	187
2.4.2.4	Des coefficients dispendieux et des problèmes d'éthique.....	187
2.4.2.5	Synthèse et conséquences .....	190
2.5	<b>GRANDE SYNTHÈSE DU CHAPITRE II</b> .....	191
2.5.1	<i>Synthèse des relations thermodynamiques économie-nature</i> .....	191
2.5.2	<i>Synthèse fonctionnelle de <math>pV</math> et <math>d(pV)</math></i> .....	193
2.5.2.1	$d(pV)$ , les deux principes « et » l'accumulation énergétique.....	194
2.5.2.2	Une fonction d'état des écosystèmes ?.....	197
2.5.2.3	Une fonction d'état illustrant le concept de bilan écologique .....	198
2.5.2.4	$pV$ , $d(pV)$ et la distance à l'équilibre du vivant.....	198
2.5.3	<i>Problématique conclusive et objectifs de résolution</i> .....	199
2.5.3.1	Combiner les approches thermodynamiques et statistiques .....	200
	<i>De la diversité à la biodiversité</i> .....	201
	<i>La biodiversité, une diversité de différenciation</i> .....	202
2.5.3.2	Ponter les « différentiels » statistiques et thermodynamiques.....	202
2.5.4	<i>Synthèse conclusive sur la relation exergie/biodiversité</i> .....	204
2.5.4.1	L'exergie mise en rapport avec les diversités $\alpha$ , $\beta$ et $\gamma$ .....	204
2.5.4.2	Diversités structurales, fonctionnelles et biologiques .....	207
	<b>.CHAPITRE III. MESURER NOS ACTIFS ECOLOGIQUES</b> .....	208
3.1	<b>L'INDICE <math>K_A</math> ET LA DISTANCE A L'EQUILIBRE STATISTIQUE (<math>D_{ES}</math>)</b> .....	209
3.1.1	<i>Première hypothèse fondamentale</i> .....	209
3.1.2	<i>Conditions générales d'élaboration de l'indice recherché</i> .....	209
3.1.2.1	Un indice de diversité différentielle, ou <i>pression</i> de diversité .....	209
3.1.2.2	Une diversité loin de l'équilibre .....	210
3.1.2.3	Une distance à l'équilibre improbable, conforme au second principe .....	211
3.1.3	<i>Critères de mise au point</i> .....	211
3.1.3.1	A - Une mesure différentielle de la diversité, de type $\beta$ .....	211
	<i>C'est une mesure différentielle de diversité</i> .....	211
	<i>C'est une mesure de diversité <math>\beta</math></i> .....	212
3.1.3.2	B - Une mesure statistique de distance à l'équilibre .....	212
	<i>C'est une distance à l'équilibre statistique</i> .....	212
	<i>C'est un rendement d'éloignement de l'équilibre entre 0 et 1</i> .....	212
3.1.3.3	C - Une distance à l'équilibre conforme au second principe .....	213
3.1.4	<i>L'indice <math>K_A</math> de distance à l'équilibre</i> .....	214
3.1.4.1	Formulation de l'indice .....	214
	<i>Partie 1 : L'équilibre <math>E_e</math></i> .....	214
	<i>Partie 2 : La diversité différentielle <math>D_1</math></i> .....	214
	<i>Partie 3 : La distance absolue à l'équilibre <math>D_2</math></i> .....	214
	<i>Partie 4 : La distance absolue maximale à l'équilibre <math>D_{2max}</math></i> .....	214
	<i>L'Indice <math>K_A</math> de distance à l'équilibre statistique : <math>D_{ES} = D_2/D_{2max}</math></i> .....	215

3.1.4.2	Illustration, représentation et calcul de l'indice $K_a$ .....	216
	<i>Illustration comparative des variations des indice <math>K_a</math> et <math>H'</math> (Shannon).....</i>	216
	<i>Représentation 2D et calcul de l'indice (exemples).....</i>	217
	<i>Représentation de l'équilibre et d'une diversité <math>\beta</math> en 3D.....</i>	218
3.1.5	L'indice $K_a$ mesure la diversité structurale : vérifications.....	219
3.1.5.1	Mesurer la diversité structurale d'un territoire : Le cas du PNRPA.....	220
3.1.5.2	Corrélations diversité structurale / exergie.....	224
	<i>Niveau 1 : Indice <math>K_a</math> et directionnalité de réduction dans l'Ecosphère.....</i>	225
	<i>Niveau 2 : Indice <math>K_a</math> et directionnalité de réduction dans la Biosphère.....</i>	229
	<i>Niveau 3 : Indice <math>K_a</math> et distance à l'équilibre de la Biosphère.....</i>	230
3.2	CLARIFICATIONS : FONCTIONS REDOX DE LA BIOSPHERE ET DE L'ECOSPHERE.....	233
3.2.1	Caractérisation de la Biosphère, le « domaine » du vivant.....	233
3.2.1.1	Fonctions redox de la matière vivante au sein de la Biosphère.....	234
3.2.1.2	La Biosphère et le premier principe biogéochimique.....	235
3.2.2	De la Biosphère à l'Ecosphère.....	237
3.2.2.1	Note sur le rapport Biosphère/Ecosphère chez Vernadsky.....	237
3.2.2.2	La frontière de l'endosymbiose.....	237
3.2.2.3	L'Ecosphère comme « noyau » de la Biosphère.....	239
3.2.2.4	Fertilité biologique et frontière Ecosphère/Biosphère de la lithosphère.....	241
3.2.2.5	Rôles comparatifs Biosphère/Ecosphère vis à vis de la diversité.....	242
3.2.3	Caractérisation de l'Ecosphère, la « maison » du vivant.....	243
3.2.3.1	Limites spatio-temporelles et zones d'émergence de l'Ecosphère.....	243
3.2.3.2	Fonction redox à réduction dominante des autotrophes de l'Ecosphère.....	244
	<i>A - Stocks d'exergie-CHL et diversité structurale de l'Ecosphère.....</i>	246
	<i>B - Flux d'exergie-GPL et alimentation des réseaux trophiques.....</i>	248
3.2.3.3	Fonction redox à oxydation dominante des hétérotrophes de l'Ecosphère.....	249
3.2.3.4	L'Ecosphère et le second principe biogéochimique.....	251
3.2.4	Synthèse de la section : $pV$ , $d(pV)$ et la distance à l'équilibre « redox » du vivant.....	252
3.3	L'INDICE $K_a$ ET LA DISTANCE A L'EQUILIBRE THERMODYNAMIQUE ( $D_{ET}$ ).....	255
3.3.1	Seconde hypothèse fondamentale.....	255
3.3.2	Conjugaison $pV.m$ , Joule.mètre et $D_{ET}$ .....	257
3.3.3	Mesurer les deux composantes de la $D_{ET}$ : $D_{ER}$ et $D_{EO}$ .....	260
3.3.3.1	De la molécule à l'organisme, et de l'écosystème au territoire : Complexification métabolique et changement d'échelle.....	260
3.3.3.2	Les CHL & GPL : Une obligatoire simplification des mesures.....	261
3.3.3.3	Système de mesure de la $D_{ER}$ et de la $D_{EO}$ , de l'écosystème au territoire.....	263
3.4	MESURE DE LA $D_{ET}$ ( $D_{ER} + D_{EO}$ ) D'UN ECOSYSTEME : VERIFICATION, COMPARAISONS ET PERTINENCE.....	265
3.4.1	Objectifs de vérification.....	265
3.4.2	Etude de cas : L'écosystème marin de l'estuaire de Mondego (Portugal).....	265
3.4.2.1	Données de référence.....	265
3.4.2.2	Obtention des facteurs $\beta$ et de l'exergie CHL-GPL des organismes.....	266
3.4.2.3	Mesure de la diversité totale : Comparaison de l'Eco-exergie et de l'exergie CHL-GPL de l'écosystème.....	268
	<i>A - Mesure de l'écosystème fondée sur les facteurs <math>\beta</math>.....</i>	268
	<i>B - Mesure de l'écosystème fondée sur l'exergie CHL-GPL.....</i>	270
	<i>C - Mise en évidence d'une directionnalité redox.....</i>	272
	<i>D - Synthèse comparative de l'éco-exergie et de l'exergie CHL-GPL.....</i>	273
3.4.2.4	Mesure des diversités structurales « et » fonctionnelles : Exergie biogéochimique et $D_{ET}$ de l'écosystème.....	274
	<i>Distinguer la réduction de l'oxydation.....</i>	274
	<i>Introduire la conjugaison <math>pV.m</math>.....</i>	276
	<i>Etablir le diagnostic « vital » de l'écosystème.....</i>	277
3.5	CONCLUSIONS DU CHAPITRE III ET DE LA DEUXIEME PARTIE.....	280
3.5.1	Sur la recherche et ses résultats.....	280
3.5.2	Sur la signification écosystémique du Joule.mètre ( $J.m$ ).....	281
3.5.2.1	De la tension surfacique à la tension volumique.....	281
3.5.2.2	De $pV$ à $pV.m$ .....	285
3.5.3	Sur la signification économique du Joule.mètre ( $J.m$ ).....	286

## TROISIEME PARTIE : *Développements méthodologiques, et mise en œuvre du Bilan écologique*

<b>.CHAPITRE IV. TERRITOIRE ET ANNEES DE REFERENCE .....</b>	<b>290</b>
4.1 TERRITOIRE DE REFERENCE : LES « COMMUNES » DU PNRPA .....	291
4.2 ANNEES DE REFERENCE.....	293
<b>.CHAPITRE V. ACTIF(S) ECOLOGIQUE(S).....</b>	<b>294</b>
5.1 L'ACTIF ECOLOGIQUE : DEFINITION GENERALE ET EMPRISE .....	295
5.2 METHODOLOGIE DE CALCUL : DE LA D <sub>ET</sub> D'UN ECOSYSTEME A L'ACTIF ECOLOGIQUE D'UN TERRITOIRE .....	296
5.2.1 <i>De l'écosystème au territoire : Problématique de synthèse</i> .....	296
5.2.2 <i>Justification et présentation du cadre méthodologique</i> .....	297
5.2.2.1 La biodiversité est-elle simplifiable ? .....	297
5.2.2.2 Développement des principes de mesure de la D <sub>ET</sub> à grande échelle .....	298
<i>Pour ce qui concerne l'indice Ka</i> .....	298
<i>Pour ce qui concerne l'exergie</i> .....	298
<i>Pour ce qui concerne l'usage des CHL-GPL</i> .....	298
<i>Pour ce qui concerne la diversité redox et le niveau d'information</i> .....	298
<i>Synthèse</i> .....	298
5.2.2.3 Cadre primitif de mesure de l'Actif écologique d'un territoire.....	299
<i>Source des données de l'exergie CHL-GPL à l'échelle territoriale</i> .....	299
<i>Agrégation des valeurs d'indice lors des changements d'échelle</i> .....	299
<i>Directionnalité territoriale et humidité des matières carbonées</i> .....	300
<i>GPP/NPP et comptabilisation de l'eau</i> .....	301
<i>Mesurer l'exergie « utile » d'un territoire</i> .....	301
5.2.3 <i>Mise en œuvre du cadre méthodologique</i> .....	301
5.2.3.1 Stocks d'exergie (biomasse), année n.....	302
5.2.3.2 Flux et stocks d'exergie (biomasse), année n+1 .....	302
5.3 <b>ACTIF ECOLOGIQUE : PARTIE 1 - STOCKS ANNEE N</b> .....	303
5.3.1 <i>Stocks de carbone : Données source, principes de calcul</i> .....	303
5.3.1.1 Végétation : principes de base, nature et source des données .....	303
5.3.1.2 Sol : principes de base, nature et source des données .....	304
5.3.2 <i>Stocks de carbone et diversité structurale du Territoire</i> .....	305
5.3.3 <i>Stocks d'exergie pV et D<sub>ET</sub> (D<sub>ER</sub> + D<sub>EO</sub>) des communes du Territoire (année n)</i> .....	306
5.4 <b>ACTIF ECOLOGIQUE : PARTIE 2 - FLUX D'EXERGIE ANNEE N+1</b> .....	307
5.4.1 <i>Flux de carbone : Données source et méthode de calcul</i> .....	307
5.4.1.1 GPP et NPP .....	307
5.4.1.2 Limites de la GPP et de la NPP .....	308
5.4.2 <i>Flux de carbone : NPP du Territoire</i> .....	309
5.4.3 <i>Stœchiométrie territoriale : Méthodologie générale</i> .....	310
5.4.3.1 Des stocks de carbone aux flux végétatifs de croissance .....	310
5.4.3.2 Eléments de stœchiométrie territoriale .....	311
5.4.3.3 Principes généraux de calcul de la D <sub>ER</sub> et de la D <sub>EO</sub> des flux .....	312
5.4.3.4 Précisions sur la GPP et la NPP dans le tableau stœchiométrique .....	313
5.4.4 <i>Stœchiométrie territoriale : Résultats</i> .....	313
5.5 <b>ACTIF ECOLOGIQUE : PARTIE 3 - STOCKS ANNEE N + 1</b> .....	317
<b>.CHAPITRE VI. PASSIF(S) ECOLOGIQUE(S).....</b>	<b>320</b>
6.1 <b>LE PASSIF ECOLOGIQUE : PRESENTATION GENERALE ET SIGNIFICATION</b> .....	321
6.1.1 <i>Présentation</i> .....	321
6.1.2 <i>Signification</i> .....	321
6.1.3 <i>Conséquences</i> .....	323
6.2 <b>METHODOLOGIE DE CALCUL : ANTECEDENTS ET PROBLEMATIQUE</b> .....	324
6.2.1 <i>Antécédents</i> .....	324
6.2.2 <i>La problématique d'une méthodologie intégrée</i> .....	326
6.2.2.1 Vue d'ensemble de la relation Ee/REAP, méthode primitive .....	326
6.2.2.2 Vue d'ensemble du problème Ee/REAP : la « nomenclaturomanie ».....	326
6.2.2.3 Problème spécifique au calcul du passif écologique .....	328
6.3 <b>UNE NOUVELLE METHODOLOGIE INTEGREE</b> .....	330
6.3.1 <i>Généralités : Le TES français et la SUT anglo-saxonne</i> .....	330
6.3.2 <i>Phase 1 - Méthodologie de calcul du nouveau passif national</i> .....	331
6.3.2.1 Nomenclature simplifiée d'agrégation des données : la NAAT 14 .....	332
6.3.2.2 Agrégation du TES 118 : Le TES 14 symétrique <i>monétaire</i> .....	333
6.3.2.3 Confection du TES 14 symétrique biophysique.....	334

6.3.2.4	Confection du TES 14 <i>biophysique</i> complet, ou Passif écologique .....	335
6.3.3	<i>Phase intermédiaire : Passer des entreprises aux ménages</i> .....	335
6.3.3.1	De NAAT14 (entreprises) à COICOP13 (ménages) .....	335
6.3.3.2	Nomenclature simplifiée de désagrégation du passif : COICOP13 .....	336
6.3.3.3	Table de correspondance NES 14 → COICOP 13 .....	337
6.3.4	<i>Phase 2 - Méthodologie de désagrégation du passif national</i> .....	337
6.3.5	<i>Cadre synthétique de calcul du Passif écologique</i> .....	338
6.4	<b>RESULTATS PHASE 1 : LE PASSIF ECOLOGIQUE DE LA FRANCE</b> .....	340
6.4.1	<i>TES 14 monétaire complet de la France, et son annexe</i> .....	340
6.4.2	<i>Données de référence du TES biophysique (ou Passif écologique)</i> .....	342
6.4.3	<i>Passif écologique de la France, reflet biophysique du TES monétaire</i> .....	343
6.5	<b>RESULTATS PHASE 2 : LE PASSIF ECOLOGIQUE DU TERRITOIRE</b> .....	347
6.5.1	<i>Le TES 14 monétaire complet du Territoire, et son annexe</i> .....	347
6.5.2	<i>Le Passif écologique du Territoire, reflet biophysique du TES monétaire</i> .....	349
6.6	<b>EXTRAPOLATIONS DU PASSIF ECOLOGIQUE</b> .....	351
6.6.1	<i>Extrapolations du Passif écologique de la France</i> .....	351
6.6.1.1	<i>Passif écologique de la France, en Tep (exergie) / habitant, directes &amp; indirectes</i> .....	352
6.6.1.2	<i>Intensité énergétique (exergie) de la monnaie, intensité monétaire des échanges de masse et énergie</i> .....	353
6.6.1.3	<i>Tension de surface, DSe, DSeg, indice d'autonomie territoriale</i> .....	354
6.6.2	<i>Extrapolations du Passif écologique du Territoire</i> .....	357
	<b>.CHAPITRE VII. BILAN ECOLOGIQUE</b> .....	<b>362</b>
7.1	<b>VERSION A, FONCTIONNELLE ET SIMPLIFIEE</b> .....	<b>363</b>
7.1.1	<i>Compléments méthodologiques</i> .....	363
7.1.1.1	<i>Recouvrement de l'Actif et du Passif écologiques</i> .....	363
7.1.1.2	<i>Cadre structurel de calcul du Bilan fonctionnel</i> .....	364
7.1.2	<i>Résultat : Bilan écologique du Territoire (version A)</i> .....	366
7.1.2.1	<i>Sur le concept et l'indice d'écodéveloppement</i> .....	367
7.1.2.2	<i>Sur l'exergie utile, inutilisable ou inutile, produite et consommée</i> .....	371
	<i>Exergie utile produite dans l'Ecosphère</i> .....	371
	<i>Exergie « inutilisable », produite dans l'Ecosphère</i> .....	372
	<i>Exergie utile consommée dans l'Anthroposphère</i> .....	373
7.2	<b>VERSION B, STOECHIOMETRIQUE (ET THERMODYNAMIQUE)</b> .....	<b>374</b>
7.2.1	<i>Le postulat d'un bilan stœchiométrique de l'Anthropocène</i> .....	374
7.2.2	<i>Quelques principes conceptuels et méthodologiques</i> .....	376
7.2.2.1	<i>Quid des impacts de l'Anthroposphère sur l'Ecosphère ?</i> .....	376
7.2.2.2	<i>Variation d'exergie entre compartiments AHL et variation de D<sub>ET</sub></i> .....	376
7.2.2.3	<i>Quid de la mesure en volume et pression de l'exergie des territoires, naturels et urbains ?</i> .....	377
7.2.2.4	<i>Cadre de calcul du bilan stœchiométrique (et thermodynamique)</i> .....	377
7.2.2.5	<i>Estimer la variation de D<sub>ET</sub> entre année n et n+1</i> .....	379
7.2.2.6	<i>Cas particulier de la biomasse allouée aux compartiments AHL</i> .....	379
7.2.3	<i>Résultat : Bilan écologique du Territoire (version B)</i> .....	380
	<b>. CONCLUSION GENERALE</b> .....	<b>384</b>
A.	<b>EXIGENCES, AUTONOMIE ET TRAITEMENT DU SUJET</b> .....	<b>385</b>
B.	<b>RESULTATS COMPARES AUX ENJEUX ET OBJECTIFS</b> .....	<b>387</b>
1.	<i>Rendre compte de la diversité biologique</i> .....	387
2.	<i>Calculer l'actif et le passif écologiques du Territoire</i> .....	389
C.	<b>SIGNIFICATION ET UTILITE DU BILAN ECOLOGIQUE</b> .....	<b>390</b>
1.	<i>Une signification générale</i> .....	390
2.	<i>Une utilité territoriale : Rendre le constat explicite, orienter vers de nouvelles activités</i> .....	392
3.	<i>Une utilité globale : Caractériser les voies d'un développement écologique</i> .....	394
D.	<b>APPROFONDISSEMENT DES RESULTATS &amp; PERSPECTIVES DE RECHERCHE</b> .....	<b>396</b>
1.	<i>Regard d'ensemble sur une version pilote</i> .....	396
2.	<i>Vérifier, valider les hypothèses, et élargir leur champ d'application</i> .....	397
3.	<i>Boucler les concepts opératoires et principes de calcul</i> .....	398
4.	<i>Développer le Bilan fonctionnel</i> .....	398
5.	<i>Vérifier, valider le postulat du bilan stœchiométrique, et le développer</i> .....	399
E.	<b>EXPLORER LES CHEMINS DU DEVELOPPEMENT ECOLOGIQUE</b> .....	<b>400</b>
	<b>REFERENCES SIGNIFICATIVES</b> .....	<b>404</b>
	<b>LISTE DES SIGLES ET ABREVIATIONS</b> .....	<b>414</b>
	<b>TABLE DES FIGURES, TABLEAUX ET ILLUSTRATIONS</b> .....	<b>415</b>
	<b>SOMMAIRE DETAILLE</b> .....	<b>418</b>