



HAL
open science

La biosphère selon Vernadsky: contradiction du principe de Carnot

Richard Loiret

► To cite this version:

Richard Loiret. La biosphère selon Vernadsky: contradiction du principe de Carnot : Rendre compte de la biodiversité dans le bilan des relations homme-nature. 2012. hal-00911684v1

HAL Id: hal-00911684

<https://hal.science/hal-00911684v1>

Preprint submitted on 29 Nov 2013 (v1), last revised 17 Jul 2014 (v2)

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.

CR No. 2012-04
Month 2012 / Mois 2012

RENDRE COMPTE DE LA BIODIVERSITE
DANS LE BILAN DES RELATIONS HOMME-NATURE
LA BIOSPHERE SELON VERNADSKY
CONTRADICTION DU PRINCIPE DE CARNOT

RICHARD LOIRET



© Centre international « REEDS »

Université de Versailles Saint-Quentin-en-Yvelines
Bâtiment « Aile Sud » UVSQ à la Bergerie Nationale
15, Bergerie Nationale, 78514 Rambouillet - France
Email : Secretariat.Reeds@uvsq.fr
Website : www.reeds.uvsq.fr



Table des matières

1. RESUME INTRODUCTIF	4
2. ETABLIR UN BILAN DES RELATIONS HOMME-NATURE	7
2.1 DE LA PHYSIOCRATIE A L'ECONOMIE ECOLOGIQUE	7
2.2 L'EMPREINTE ECOLOGIQUE, TRES JEUNE FILLE DE L'ECONOMIE ECOLOGIQUE.....	8
2.3 DE L'IDENTIFICATION DES LIMITES DE L'EMPREINTE ECOLOGIQUE ...	8
2.4 ... A UNE CONTRADICTION FONDAMENTALE AVEC LA BIODIVERSITE.....	10
Figure 1 : Les contradictions entre biocapacité (empreinte écologique) et biodiversité	10
2.5 ... PUIS A UN MODELE DE DEVELOPPEMENT SOUTENABLE CONTRADICTOIRE AVEC LA BIODIVERSITE	
11	
2.6 ... ET JUSQU'AU « MUR » DE LA BIODIVERSITE !	11
2.6.1 <i>Qu'est-ce que la diversité biologique ? Comment la mesurer ?</i>	11
2.6.2 <i>La biodiversité n'est-elle qu'une seule mesure physique ?</i>	14
2.7 ... ET A LA QUESTION DU VIVANT FACE A LA SCIENCE !.....	15
2.7.1 <i>Le vivant est-il mesurable au sens de la physique ?</i>	15
2.7.2 <i>Les deux premiers principes de la thermodynamique ...</i>	16
2.7.3 <i>... et puis ce caractère très spécial de l'entropie</i>	16
2.8 OBJECTIF DE TRAVAIL : EXISTE T-IL UNE EXCEPTION AU PRINCIPE DE CARNOT ?	18
3. A LA RECHERCHE D'UNE EXCEPTION AU PRINCIPE DE CARNOT	20
3.1 LE POINT DE VUE « THERMODYNAMIQUE »	20
3.1.1 <i>Le démon de Maxwell (1831-1879)</i>	21
3.1.2 <i>L'entropie de Boltzmann (1844-1906)</i>	21
3.1.3 <i>Schrödinger (1887-1961), l'entropie négative et le code génétique</i>	21
3.1.4 <i>Théorie de la communication et entropie négative selon Wiener (1894-1964)</i>	23
3.1.5 <i>Théorie de l'information et entropie de Shannon (1916-2001)</i>	23
3.1.6 <i>Contribution de Léon Brillouin (1889-1969)</i>	24
3.1.6.1 Le pont entre entropie thermodynamique et entropie de l'information	24
3.1.6.2 La nég-entropie et le principe de Carnot généralisé.....	24
3.1.6.3 La réfutation du démon de Maxwell.....	24
3.1.7 <i>Von Bertalanffy (1901-1972) et la théorie générale des systèmes</i>	24
3.1.7.1 Systèmes fermés et systèmes ouverts, équilibre et stabilité.....	25
3.1.7.2 Systèmes ouverts et viols présumés de la loi physique.....	26
3.1.8 <i>Synthèse à ce stade : Le principe SBVB</i>	28
3.1.9 <i>Ilya Prigogine (1917-2003) et la théorie des structures dissipatives</i>	28
3.1.9.1 Systèmes isolés, systèmes fermés, systèmes ouverts.....	29
3.1.9.2 Ouverture d'un système isolé, phénomènes irréversibles, structures dissipatives	29
3.1.9.3 Dégradation entropique et « quatrième loi » de la thermodynamique.....	30
3.1.9.4 Thermodynamique non linéaire et structures dissipatives.....	30
3.1.9.5 La mesure de l'entropie : une nouvelle science ?	31
3.1.9.6 Définition fondamentale de la ville : c'est une structure dissipative !.....	32
3.1.9.7 Retour aux positions paradoxales de la science	32
3.1.10 <i>Nicholas Georgescu-Roegen (1906-1994) et La Décroissance</i>	32
3.1.11 <i>... et quand l'économie écologique propose une « science » de la soutenabilité</i>	35
3.2 LE POINT DE VUE « VITALISTE »	37
3.2.1 <i>Derrière le mur, mais juste de l'autre côté</i>	37
3.2.2 <i>Lovelock, concepts généraux, première hypothèse</i>	38
3.2.2.1 Quand Lovelock nous apporte énormément.....	40
3.2.2.1.1 L'atmosphère terrestre, un produit « néguentropique » de la Biosphère	40
Figure 2 : 1ère théorie d'évolution de l'atmosphère	41
Figure 3 : Théorie récente d'évolution de l'atmosphère	41
Figure 4 : Théorie récente d'évolution de l'oxygène atmosphérique	41
3.2.2.1.2 De la Terre système « fermé » à la Biosphère système « ouvert »	42
3.2.3 <i>Une problématique sémantique de la Biosphère</i>	43
3.2.3.1 Première clarification du concept.....	43
3.2.3.2 Premier découpage de la Biosphère	45
Figure 5 : La Biosphère, « domaine » du vivant.....	46
Figure 6 : Biosphère et Géosphère, ou Biogéosphère.....	46
3.2.4 <i>« Gaïa » et le renouveau de la controverse vitalo-mécaniste</i>	47
3.2.4.1 Une éclipse lunaire de la Biosphère.....	47
3.2.4.2 Pour en finir avec la paternité des hypothèses soutenant Gaïa	47

3.3	LE POINT DE VUE DE « VERNADSKY » (1863-1945)	50
3.3.1	<i>Le dernier humaniste</i>	50
3.3.2	<i>Dépasser la controverse vitalo-mécaniste</i>	51
3.3.2.1	Premier séjour en France, application de la thermodynamique à la chimie	52
3.3.2.1.1	Henri Le Chatelier (1850-1936) et Josiah Willard Gibbs (1839-1903)	52
3.3.2.1.2	La « généralisation empirique »	53
3.3.2.1.3	Ferdinand Fouqué (1828-1904)	53
3.3.2.2	Second séjour en France : Quand la vie « pourrait bien » faire exception au principe de Carnot	54
3.3.2.2.1	Matière vivante et dissymétrie de Pasteur	54
3.3.2.2.2	Une « thermodynamique du vivant » très problématique	55
3.3.3	<i>Vernadsky et Tolstoï : compléments biographiques de novembre 2011</i>	56
3.3.4	<i>Quand Vernadsky dit le fond de sa pensée</i>	57
4.	LA « CONTRADICTION » DE VERNADSKY	58
4.1	LES « DEUX » PRINCIPES DE LA BIOGEOCHIMIE	59
4.1.1	<i>Première formulation</i>	59
4.1.2	<i>Préalables à la seconde formulation</i>	59
4.1.2.1	Contexte : une nouvelle épistémè	59
4.1.2.2	Propriétés planétaires de la vie	60
4.1.3	<i>Seconde formulation</i>	60
4.2	CONTRADICTION DU PRINCIPE DE CARNOT	60
4.2.1	<i>Formulation</i>	60
4.2.2	<i>Expression</i>	61
4.3	COMMENTAIRES GÉNÉRAUX	61
4.3.1	<i>Sur les deux principes</i>	61
4.3.2	<i>Sur la contradiction de Vernadsky</i>	63
4.3.3	<i>Sur deux principes et non un seul</i>	63
4.3.4	<i>Croissance et complexité</i>	64
	Figure 7 : Le mur de la complexité	64
5.	ETUDE DU PREMIER PRINCIPE BIOGEOCHIMIQUE	65
5.1	INTRODUCTION	65
5.2	DE L'ÉTERNITÉ ... AUX ÂGES GÉOLOGIQUES	67
	Figure 8 : Echelle indicative des périodes géologiques (éons, ères, ...), en millions d'années	68
	Figure 9 : La Biosphère en expansion	68
5.3	ORIGINES DE LA BIOSPHERE, STABILITÉ CLIMATIQUE, STABILITÉ DU CONCEPT	69
5.3.1	<i>Changer de regard sur la Terre</i>	69
	Figure 10 : La Terre, vaisseau spatial isolé dans l'espace cosmique	69
	Figure 11 : La Biosphère comme enveloppe terrestre	70
5.3.2	<i>La Biosphère, système ouvert</i>	70
	Figure 12 : Accrétion des astéroïdes chondritiques	71
	Figure 13 : Astéroïdes chondritiques et achondrites	71
	Figure 14 : Le cycle des roches	71
	Figure 15 : Représentation (imaginée) de la Biosphère, vue comme système ouvert	72
5.3.3	<i>La Biosphère, champ de stabilité vitale</i>	73
5.3.4	<i>Stabilité de la Biosphère et stabilité de l'eau liquide</i>	74
	Figure 16 : Bilan radiatif de la Terre, en W/m ²	74
	Figure 17 : Histoire de la température, de l'eau et du CO ₂ au début de l'Hadéen	75
	Figure 18 : Variations de température de surface et de pression CO ₂ lors de l'Hadéen	76
	Figure 19 : Evolution de l'environnement terrestre depuis l'Hadéen	76
5.3.5	<i>Stabilité vitale et naissance de la Biosphère</i>	77
5.4	ESPACES SEMANTIQUES DE LA BIOSPHERE	78
5.4.1	<i>Fonder l'espace du vivant dans la structure terrestre : La dissymétrie hydrosphère/lithosphère</i> 78	
5.4.2	<i>Structurer l'espace du vivant</i>	80
5.4.2.1	Matière vivante « et » organismes vivants	80
5.4.2.1.1	Masse homogène et organismes autonomes	80
5.4.2.1.2	Milieu géologique et milieu biologique	82
5.4.2.2	Champs thermodynamiques de la matière vivante « et » des organismes vivants	82
5.4.2.3	Champs de stabilité « et » d'existence vitale	84
	Figure 20 : Champs thermodynamiques de stabilité et d'existence vitale de la Biosphère	85
5.4.2.4	Domaine « et » maison du vivant	85

5.5	BIOSPHERE « ET » ECOSPHERE.....	86
5.5.1	<i>L'écosphère, une nouvelle confusion autour de la Biosphère.....</i>	86
5.5.2	<i>L'Ecosphère, « maison » du vivant, « au sein » de la Biosphère.....</i>	87
	Figure 21 : L'Ecosphère au sein de la Biosphère	88
5.6	FONCTIONS VITALES DE LA BIOSPHERE.....	88
5.6.1	<i>Matière vivante et matière biogène.....</i>	88
5.6.1.1	Au début « deux » types de matière.....	88
5.6.1.2	Puis un « troisième type », les minéraux vadoses.....	89
5.6.1.3	Et donc « trois » types de matière.....	89
5.6.1.4	Zoom sur les corps vadoses (ou biogènes) et l'altération superficielle.....	89
5.6.1.5	Corps naturels « bio-inertes », migration des éléments chimiques.....	91
5.6.2	<i>Fonction biogénique de la matière vivante : les véritables autotrophes.....</i>	93
	Figure 22 : Les trois domaines de l'arbre de vie (Archaea, Bacteria, Eucarya).....	94
	Figure 23 : Ecosystème microbien hypersalin illustrant l'évolution primitive de la Biosphère.....	95
5.6.3	<i>« Flux » de migration et « stocks » de corps biogènes</i>	95
5.6.3.1	Migration générale des éléments chimiques, cycle global.....	95
5.6.3.2	Flux de migration atmosphérique et terrestre.....	96
5.6.3.3	Concentrations vitales de la terre ferme (lithosphère).....	96
5.6.3.4	Flux de migrations et concentrations vitales des bassins aqueux de la terre ferme.....	97
5.6.3.5	Flux de migration et concentrations vitales océaniques	97
5.6.3.6	... et cycle des roches.....	98
5.7	FONCTIONS VITALES ET CYCLES BIOGEOCHIMIQUES.....	99
5.7.1	<i>Tableau de synthèse des fonctions vitales de la Biosphère</i>	100
	Figure 24 : Synthèse biogéochimique du cycle du carbone.....	101
	Figure 25 : Représentation schématique du Bilan de l'oxygène.....	102
5.7.2	<i>Un « système vivant » créateur de la Biosphère.....</i>	103
	Figure 26 : Quelques cyanobactéries et diatomées du phytoplancton	104
5.7.3	<i>Une vision globale des cycles biogéochimiques.....</i>	104
	Figure 27 : Modèle généralisé des transformations cycliques de la Biosphère	105
	Figure 28 : Diagramme schématique du réseau de médiations biologiques des cycles de la Biosphère.....	105
5.8	INTERPRETATION THERMODYNAMIQUE DU PREMIER PRINCIPE	106
5.8.1	<i>Introduction</i>	106
5.8.1.1	La source de toute(s) valeur(s).....	106
5.8.1.2	La coproduction entropie \square néguentropie.....	107
5.8.2	<i>Reprise du premier principe.....</i>	108
5.8.3	<i>Entropie « positive » proche de zéro et entropie « négative »</i>	109
5.8.4	<i>Séparation néguentropique des états de la matière, du démon au vivant.....</i>	109
5.8.5	<i>Activation de systèmes dissipatifs, au delà de l'équilibre.....</i>	110
5.8.6	<i>Organisation néguentropique de la Biosphère et cycles dissipatifs.....</i>	111
5.8.7	<i>Flux solaires ou énergie libre ?.....</i>	111
5.8.8	<i>La matière vivante, source primaire de néguentropie</i>	112
	Figure 29 : Réactions de réduction et d'oxydation autour d'un fumeur noir.....	112
5.8.9	<i>Coproduction matière vivante et systèmes dissipatifs.....</i>	113
5.8.9.1	Mécanisme des systèmes dissipatifs	113
5.8.9.2	Coproduction entropie /néguentropie.....	114
	Figure 30 : Coproduction entropie/néguentropie de la matière vivante	114
5.8.10	<i>Coproduction entropie / néguentropie : une démonstration mathématique.....</i>	115
	Figure 31 : Coproduction néguentropique des processus géophysiques	116
5.8.11	<i>La manifestation la plus complète de la Biosphère.....</i>	117
5.8.11.1	La Biosphère, structure « gonflable »	117
5.8.11.2	Schéma de synthèse et bilan thermodynamique du premier principe.....	118
	Figure 32 : Représentation des cycles de transformation néguentropique de la Biosphère.....	118
5.9	LE POINT DE VUE D'EDGARD MORIN.....	119
5.9.1	<i>Processus néguentropique de production et état néguentropique</i>	120
5.9.2	<i>Portée du processus néguentropique d'organisation.....</i>	121
5.9.3	<i>Coproduction entropie-néguentropie.....</i>	121
6.	EN GUISE DE CONCLUSION	122
7.	REFERENCES.....	124
8.	MOT CLEFS, USUELS ET INÉDITS.....	127

1. Résumé introductif

Bien après que la lointaine Physiocratie ait constitué le fondement de la première pensée économique, une nouvelle approche comparant les flux matériels et monétaires de l'économie, l'Economie Ecologique, impose progressivement son pragmatisme à une économie planétaire « dématérialisée » qui pensait pouvoir reléguer de telles réflexions au magasin des accessoires.

Les questions de l'Economie Ecologique sont devenues si cruciales et partagées, que nos grandes institutions internationales ont voulu les reprendre à leur compte et établir des standards d'intégration environnement-économie susceptibles de guider les dirigeants politiques de tous les pays. Ce qui est le cas du « Système de Comptes Intégrés de l'Environnement et de l'Economie », publié par le service statistique de l'ONU, en partenariat avec la Commission Européenne, le FMI, l'OCDE et la Banque Mondiale (le SEEA 2003, aujourd'hui en révision).

C'est dans un tel contexte que depuis plus d'une décennie, l'Empreinte Ecologique, qui mesure le solde du bilan (écologique) entre un « passif » (l'empreinte en soi) synthétisant les pressions économiques exercées sur l'environnement, et un « actif » (la biocapacité) calculant les avoirs environnementaux susceptibles d'équilibrer cette pression, a pu imposer son message très communicatif de responsabilité écologique à quantité de dirigeants et de citoyens de la planète. Et ceci d'autant qu'elle a accompli la performance d'établir ce bilan aux échelles mondiales et nationales, permettant ainsi des comparaisons entre tous les continents.

Mais ce bilan écologique ne fut malheureusement valable pendant longtemps qu'à ces échelles. Quoique de multiples tentatives de calcul d'empreintes thématiques et/ou de sous territoires nationaux aient été tentées, elles furent rendues infructueuses par leur déficit de standardisation.

Ceci jusqu'à ce que le Stockholm Environment Institute (SEI) mette au point une méthode de désagrégation territoriale du « passif » des bilans nationaux, basée sur l'analyse Input-Output. Elle nous a permis de réaliser une première mise en œuvre de cette méthodologie à l'échelle française, pour ce qui concerne les communes de deux parcs naturels régionaux (PNR), en Paca et en Ile de France.

Mais l'empreinte écologique a connu un tel succès que les recherches, études et rapports se sont multipliés, surtout dans le monde anglo-saxon, soit pour en faire évoluer les standards, soit pour en déduire des applications locales et thématiques, ... soit pour la critiquer de manière plus radicale quant à ses divers paramètres de calcul.

Et ceci notamment concernant l'« actif » de l'empreinte, à savoir la mesure et le calcul des actifs environnementaux (terres agricoles, forêts, pêcheries, ...) susceptibles d'équilibrer le passif des activités humaines, quelle que soit l'échelle territoriale étudiée.

Ayant repris à notre compte cette critique pour procéder à notre propre démontage des contenus de l'empreinte écologique, nous avons pu en retirer à notre tour quelques certitudes essentielles : n'étant pas adaptée aux questions strictement environnementales des espaces « naturels », **l'empreinte écologique ne saurait établir un quelconque bilan entre écosystèmes naturels et écosystèmes humains.**

Nous avons pu ainsi vérifier à un niveau approfondi la position de la « Convention sur la diversité biologique » (UNEP 2005), selon laquelle, considérant que l'empreinte écologique n'était pas en mesure de procurer une mesure pertinente de l'insoutenable écologique, celle-ci devait concentrer son objet sur les impacts des activités humaines sur la « biodiversité ».

Notre objectif de recherche devenait ainsi de trouver un indicateur synthétique (index) de biodiversité, autonome et/ou intégré dans l'actif de l'empreinte.

Mais quoique diverses recherches aient été engagées en ce sens, aucune cependant ne nous a semblé satisfaisante et à même de répondre à la question cruciale de la diversité biologique.

Ceci d'autant que, plus l'échelle du territoire étudié est proche du réel, plus la biodiversité prend de l'importance quant aux relations s'établissant entre les différents cycles de l'eau, de l'azote, du carbone, ..., et les différentes communautés d'organismes vivants de ce territoire. Toutes choses dont cet index devrait rendre compte à l'échelle où nous l'utiliserions.

Poussant alors plus loin notre recherche des relations entre empreinte écologique et biodiversité, nous avons pu prendre connaissance du constat encore plus définitif établi par un chercheur : en fonction de ses paramètres et critères de calcul actuels, la biocapacité (actif) selon l'empreinte écologique apparaît contradictoire à la biodiversité. C'est à dire que partout où la forme de biocapacité mesurée par l'empreinte augmente, la biodiversité diminue.

Ce qui établissait dès lors que, au delà de son incapacité à mesurer la biodiversité, le « **modèle de soutenabilité** » dont l'empreinte écologique était théoriquement susceptible de nous indiquer la voie, était en réalité « contradictoire » à la préservation de la biodiversité.

Et ce qui nous amenait naturellement aux questions suivantes : Qu'est-ce que la biodiversité ? Comment la mesurer ? Pourquoi a-t-on tant de difficultés à le faire ?

C'est en pénétrant dans les profondeurs sémantiques, historiques et scientifiques de ces questions que nous nous sommes alors progressivement confronté à un obstacle théorique d'une ampleur considérable.

Mesurer la « diversité biologique » (biodiversité) de manière fiable, reproductible et comparable, s'avère comme on le verra une tâche extrêmement difficile. Quelles que soient les approches de sa définition, la biodiversité apparaît aujourd'hui comme synonyme du « vivant » et pose donc le problème de la mesure du vivant.

Plus près encore des questions qui nous préoccupent, à l'échelle des territoires, la « qualité biologique » (fertilité des sols), dans ses relations à la diversité biologique (biodiversité), s'avère elle aussi, au delà des aspects quantitatifs, le fait d'un « milieu vivant » dont la complexité est extrêmement difficile à appréhender de manière globale et unifiée.

Nos questions sortirent ainsi du domaine quantitatif des sciences physiques pour aborder celles des sciences biologiques et couvrir des disciplines aux approches contrastées. Elles nous amenèrent de proche en proche à constater qu'un index de qualité/diversité biologique devrait être un index multidimensionnel couvrant des approches scientifiques diversifiées.

Après quoi elles nous amenèrent à un nouveau constat plus difficile encore à intégrer : il ne saurait être question, en l'état actuel de nos connaissances et de nos outils, et avant « un certain nombre » d'années, de pouvoir établir un tel index synthétique.

Il ne saurait donc être question de dresser un état, autre que quantitatif, de l'apport spécifique des « actifs environnementaux » (mesure des services écosystémiques rendus) à l'économie et à l'opposé, de dresser un état autre que quantitatif de la pollution engendrée par nos économies dans la sphère du vivant.

Ce qui supposait au final qu'un bilan écologique intégrant la biodiversité était aujourd'hui impossible à établir. Toutes choses qui nous ramenaient peu ou prou à l'empreinte écologique en son état actuel et mettaient fin à notre recherche dans son caractère fondamental.

Ceci dit, derrière l'apparence immédiate, cette impossibilité traduisait-elle nos seules limites méthodologiques et matérielles ? Toutes ces difficultés autour de la biodiversité avaient amené avec elles de nouvelles questions relevant de son rôle spécifique dans le fonctionnement et la stabilité des écosystèmes.

Nous découvrons que, quelle que soit la complexité de ses définitions et de sa mesure, la biodiversité était synonyme du vivant, et que mesurer la biodiversité revenait à mesurer le vivant !

Quelle était dès lors la position des sciences physiques face à la mesure du vivant ?

Nous avons ainsi appris que cette question, qui revient à mesurer le caractère spécifique du vivant au sein d'un champ de forces que Wladimir Vernadsky, le père de l'Ecologie globale, nomme le « champ vital » de la Biosphère, était un débat récurrent datant de l'époque préindustrielle et prérévolutionnaire (certains le faisant remonter à Aristote). Un débat qui émergea au XVIIIe siècle autour de la ... Physiocratie !

Ce débat aboutira de proche en proche à une grande polémique marquant l'opposition farouche entre la théorie « vitaliste » selon laquelle le vivant n'est pas réductible aux lois physico-

chimiques, et la théorie « mécaniste », dont les partisans militaient activement pour la réduction de la vie à des phénomènes physico-chimiques.

Mais tout au long de cette polémique adviendront les révolutions agricoles et industrielles, notamment anglaises, en même temps les révolutions américaines et françaises. Toutes ensemble participeront peu ou prou à renforcer la théorie mécaniste contre la théorie vitaliste, jusqu'au triomphe de la « thermodynamique », qui devait clore définitivement le débat autour de ces grandes questions, qui marquèrent le siècle des « Lumières ».

L'histoire de la thermodynamique nous apprend en effet la formulation de deux lois fondamentales, les deux premiers principes de la thermodynamique :

Premier principe : L'énergie de l'univers est constante.

Second principe : L'entropie de l'univers tend vers un maximum.

Le second principe, dit « principe de Carnot », ayant été d'abord établi par Sadi Carnot, puis ensuite formulé par Clausius.

Ceci avec un caractère très spécial du « principe entropique », susceptible de mesurer la diminution de la capacité de travail (la dégradation, l'usure, la mort, ...) de toute chose dans l'univers : l'entropie va toujours dans le même sens.

Ce qui suppose qu'elle ne connaisse aucune exception de son caractère « universel », à partir de laquelle nous pourrions dire, par exemple : il existe un principe d'augmentation de la capacité de travail faisant diminuer l'entropie.

Le principe entropique est si affirmatif qu'un Sir Arthur Eddington proclamera que : « *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* ».

Nous nous confronterons ainsi à tant de constats définitifs autour de la mesure du vivant qu'ils nous amèneront finalement à formuler comme tel notre objectif de travail du présent cahier :

Existe-t-il une exception au principe de Carnot ?

Exception susceptible, dans le cadre de notre recherche sur la biodiversité, de montrer que le vivant exerce une activité telle qu'il puisse éventuellement contredire le second principe... et devenir de ce fait mesurable ... et opposable à l'entropie, ne serait-ce que par une « entropie de signe négatif ».

Nous avons alors passé en revue le point de vue d'auteurs dont la contribution fut fondamentale dans l'épopée d'une recherche d'exception au second principe, ou au contraire de sa réaffirmation, et qui marquèrent tous ensemble la pensée scientifique du XXe siècle.

Ceci en commençant par les physiciens, orthodoxes ou alternatifs (Maxwell, Boltzmann, Schrödinger, Wiener, Shannon, Brillouin, Von Bertalanffy, Prigogine), puis en poursuivant par les vitalistes, à l'image de Lovelock et de sa fameuse « hypothèse Gaïa ».

Nous étudierons les définitions complexes qui parsemèrent cette recherche, mais disons qu'elle fut jusque là infructueuse au regard d'un point de vue « équilibré », supposant à la fois crédibilité scientifique et affirmation construite et constructive d'une exception.

Jusqu'à ce que nous la découvriions « enfouie sous les cendres » de l'œuvre d'un auteur immense par la profondeur de sa pensée et la rigueur de son approche : *Wladimir Vernadsky (1863-1945)*. Il fut le « dernier humaniste »¹, le père de la Biosphère et de l'Écologie globale, le disciple de Tolstoï, de Mendeleïev et de Dokoutchaïev, le proche de Marie Curie, l'admirateur de Pasteur, le fondateur de la « biogéochimie ».

Au delà donc de l'examen détaillé de notre problématique, nous vous proposons de découvrir ici la « contradiction de Vernadsky ». Elle nous montre comment le vivant « fabrique » la Biosphère selon un « principe de coproduction » entropie-néguentropie, qui va bien à l'encontre de ce que l'on en disait jusqu'à présent. Un principe de coproduction que nous confirmera Edgar Morin.

¹ Les Russes le considèrent ainsi.

2. Etablir un bilan des relations homme-nature

2.1 De la Physiocratie à l'Economie écologique

Depuis la lointaine Physiocratie une part très significative de la première pensée économique a été consacrée à la mesure des services matériels objectivement rendus par la nature à l'économie humaine. Puis les révolutions agricoles, industrielles et libérales ont progressivement rétrogradé cette première approche au profit d'une économie toujours plus dématérialisée, jusqu'au triomphe d'une « pensée unique » qui pouvait sembler définitif.

En marge de cette euphorie, on a pourtant établi depuis la fin des années 60, dans la mouvance de la prise de conscience écologique, une corrélation de plus en plus étroite entre les crises environnementales, économiques et sociales. Et la nécessité s'est de nouveau imposée de définir les normes objectives d'un « système comptable » susceptible de « mesurer » puis d'établir le « bilan » (de rendre compte) des relations d'échange matérielles entre l'économie de la nature et l'économie humaine.

Mais de multiples évolutions sociétales ont fait que cette nouvelle forme de physiocratie, anciennement limitée au seul « royaume agricole »², s'est élargie depuis à l'échelle planétaire. L'économie de la nature et l'économie humaine ne peuvent être désormais regardées que comme des processus d'agrégation couvrant de proche en proche l'ensemble des écosystèmes territoriaux jusqu'à l'échelle planétaire³.

C'est tout le mérite de Cutler J. Cleveland d'avoir réalisé un historique de l'évolution et du redéploiement de cette réflexion sur les échanges nature-économie depuis la Physiocratie (Cleveland, 1999). Avec les contributions aussi fondamentales de scientifiques tels que Odum, Costanza, Ayres, Daly, Georgescu-Roegen, ..., elle a progressivement abouti à l'émergence d'une nouvelle discipline à part entière, potentielle héritière de la Physiocratie : L'Economie écologique.

Dans la dernière décennie, les grandes questions de l'économie écologique sont devenues, si cruciales et partagées, que les grandes institutions internationales ont voulu depuis les reprendre à leur compte pour en établir des standards applicables dans tous les pays. C'est aujourd'hui l'ambition affichée du « Système de Comptes Intégrés de l'Environnement et de l'Economie » (Integrated Environmental and Economic Accounting System - SEEA)⁴, que d'aider à la mise en œuvre d'un tel système harmonisé à l'échelle mondiale. Les services statistiques de l'ONU ont ainsi édité dès 2003 la première version d'un catalogue de recommandations sous la forme d'un Guide (Handbook) à l'attention des décideurs politiques (SEEA, 2003), aujourd'hui en cours de révision. Citons le début de son introduction qui traduit bien l'ensemble de la problématique :

« Ce guide procure un cadre de travail commun pour l'information économique et environnementale, permettant une analyse consistante de la contribution de l'environnement à l'économie, et de l'impact de l'économie sur l'environnement. Il a vocation à répondre aux besoins des décideurs politiques en leur procurant des indicateurs et des statistiques descriptives permettant de gérer les interactions entre l'économie et l'environnement aussi bien que de servir d'outil de planification stratégique et d'analyse politique pour identifier les chemins d'un développement plus soutenable. Ce guide couvre des thèmes complexes et divers dont certains d'entre eux sont encore sujet à débat. Quand c'est possible, il rapporte les meilleures pratiques, et quand une variété d'approches existe, leurs avantages et désavantages sont présentés. Et quoiqu'une simple recommandation ne puisse pas toujours être donnée, ce guide représente une étape majeure vers des concepts et définitions harmonisés, et procurera les bases d'un futur développement de standards. »

² Cette expression, alors consacrée à la France, fut une constante de la Physiocratie. Elle était supposée à l'époque (dernier quart du XVIIIe siècle) servir de modèle de bonne gestion aux autres royaumes européens.

³ La contrainte environnementale, notamment, depuis la mise en évidence du changement climatique et de son origine économique, impose en effet que les bilans locaux puissent être finalement agrégés jusqu'à l'échelle planétaire. Ce qui suppose l'adoption d'une unité de mesure et un mode de recueil des données locales communs à toutes les échelles.

⁴ Réalisé sous la responsabilité conjointe des Nations Unies, de la Commission Européenne, du Fond Monétaire International, de l'Organisation pour la Coopération et le Développement Economique et de la Banque Mondiale.

2.2 L'empreinte écologique, très jeune fille de l'économie écologique

De toutes ces méthodes d'agrégation puis de comparaison comptable et de bilan des relations nature-économie aujourd'hui recensées à l'échelle mondiale, on doit reconnaître à l'« empreinte écologique » (GFN, 2004, 2006; WWF, 2002-2009) d'avoir connu le plus grand succès de ces dernières années, ne serait-ce que d'estime médiatique.

Résultat d'un long et complexe processus d'agrégation puis de comparaison des comptes économiques et environnementaux, l'empreinte écologique nous donne en effet, tant à l'échelle mondiale qu'à celle des nations, un résultat comparatif parfaitement lisible des relations entre économie et environnement.

Il est composé de deux parties, chacune mesurée en hectares globaux consommés par habitant d'une collectivité, ou en « nombre de planètes » (si chaque habitant de la planète consommait le même nombre d'ha globaux que les habitants de cette collectivité) :

- Une « empreinte » (en soi), qui synthétise toutes les pressions économiques exercées sur l'environnement. En termes de comptabilité, elle est assimilable au « passif » d'un bilan.
- Une « biocapacité », qui mesure les avoirs environnementaux susceptibles de contrebalancer (ou de résister à) cette pression. En termes de comptabilité, elle est assimilable à l'« actif » d'un bilan.
- Un « solde », bénéficiaire ou déficitaire, qui constitue la différence entre les deux, et mesure la capacité à faire face ou non à cette pression.

Empreinte (Passif) et biocapacité (actif) sont ainsi assimilables (en première approche), comme en matière monétaire, aux termes d'un « bilan » (économie ↔ environnement) parfaitement lisible et compréhensible, que nous avons désigné par le nouveau terme de « Bilan écologique » (Loiret, 2011 (b)).

Mais un tel bilan n'était jusqu'en 2005 valable qu'à l'échelle mondiale et nationale. Quoique de multiples tentatives de calcul d'empreintes écologiques locales et/ou thématiques aient été tentées par divers intervenants, la méthode (méthode de calcul Bottom-up basée sur l'agrégation de données locales) a été progressivement abandonnée du fait de la non comparabilité des résultats.

Jusqu'à ce que le Stockholm Environment Institute (SEI) mette au point une méthode de désagrégation territoriale des bilans nationaux (leur partie empreinte, ou passif, seulement) basée sur l'analyse Input-Output (Wiedmann & Barrett, 2005).

Nous avons réalisé pour notre part la première mise en œuvre de cette méthodologie à l'échelle française (Loiret, 2009, 2011 (b, c)).

2.3 De l'identification des limites de l'empreinte écologique ...

L'empreinte écologique a connu un tel succès, surtout dans le monde anglo-saxon, que les recherches, études et rapports se sont multipliés, soit pour en faire évoluer les standards de calcul (robustesse des données, robustesse de la méthode d'agrégation, périodicité, ...), soit pour en déduire des applications locales et thématiques, soit pour en extraire une méthodologie plus dynamique, soit pour la critiquer de manière plus radicale.

Ce succès se mesure aujourd'hui tant au nombre de citations internet qu'au grand volume bibliographique des travaux y faisant référence. Au point que, tout comme l'économie écologique, elle a eu droit récemment à une revue historique complète de cette bibliographie critique (Wiedmann & Barrett, 2010).

Nous avons repris à notre compte cette critique pour procéder à notre propre démontage des contenus actuels (notamment l'actif) de l'empreinte écologique (méthode GFN). Nous avons pu en retirer quelques **certitudes essentielles** en termes de bilan écologique rapporté aux espaces naturels (Loiret, 2011 (a, d)) :

Conçue comme un bilan des relations d'échange entre espaces urbains, ruraux et forestiers dans leur caractère « économique », l'empreinte écologique n'est pas adaptée aux questions

strictement environnementales des espaces « naturels ». **Elle ne saurait en conséquence établir un quelconque bilan entre écosystèmes naturels et écosystèmes humains.**

Ceci pour quelques raisons principales que nous développerons dans un document spécifique :

- Les périmètres d'étude et les nomenclatures de recueil de l'empreinte écologique, quelle que soit leur échelle, ne prennent « pas du tout » en compte (notamment du fait de l'incompatibilité des nomenclatures CLC et FAO LU) : certains espaces ruraux traditionnels (surtout en France), certains espaces naturels de haute productivité/biodiversité tels que les zones humides, et d'une manière générale tous les espaces naturels non pénétrés par l'économie humaine.
- Les critères de mesure et modules de calcul, fondés sur des concepts de fertilité « économique » issus de la FAO, échouent à prendre en compte les paramètres essentiels de la « qualité biologique », et/ou de la « biodiversité », facteurs fondamentaux (mais fragiles) de résistance du vivant face à l'agressivité de nos économies.

Nous avons ainsi pu vérifier en profondeur l'analyse critique de l'empreinte réalisée au nom de la « Convention sur la diversité biologique » (UNEP, 2005). Extraits : « *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.* »

Des solutions à cette problématique sont aujourd'hui proposées (Siche et al., 2007 ; Venetoulis et al., 2008). Elles font apparaître, comme nous avons pu le vérifier nous-mêmes, que le cadre général de calcul de l'empreinte écologique, en même temps que les indicateurs de fertilité pris en compte dans ses « facteurs d'équivalence »⁵, doivent être reformulés pour pouvoir prendre en compte les surfaces et spécificités des espaces naturels.

Pour les seuls facteurs d'équivalence, ces propositions alternatives s'insèrent dans la suite des travaux initiés, notamment par Odum (Odum et al., 1986, 1991, 1996), pour quantifier les flux d'énergie solaire reçus par la biosphère, et leurs différents ratios de transformation en énergie cinétique et énergie libre, puis leur stockage (concepts d'Emergy et de Solar Embodied Joule (Sej)), notamment par la matière verte. On citera surtout les travaux centrés autour de la « NPP » (Productivité Nette Primaire, de la végétation) et de la « HANPP » (Appropriation Humaine de la NPP) (Ajtay et al., 1979; Amthor et al., 1998 ; Haberl et al., 2007; Erb et al., 2009).

Mais la NPP n'est pas en soi un indicateur de qualité et/ou diversité biologique, elle est le produit potentiel de tels facteurs, non leur cause. On constate d'ailleurs que les recherches tendant à affiner la « modélisation prédictive de la NPP » (en réduisant toujours plus l'incertitude de sa prédiction) par les Systèmes d'Observation de la Terre (EOS), concentrent toujours plus leur attention sur ses indicateurs potentiels de production. On citera parmi ceux-ci la NDVI (Index Normalisé de Différence de Végétation), la f_{APAR} (fraction utile de la radiation photosynthétiquement active absorbée par les plantes), l'Index de Surface Foliaire, la respiration hétérotrophique (Rh), les Moyennes Annuelles de Précipitation (MAP), qui représentent autant d'indicateurs susceptibles d'une relation plus directe avec cet index de biodiversité recherché, perle rare de la recherche environnementale actuelle.

⁵ Ce sont des facteurs « critique » du calcul de l'empreinte écologique. Ils font état de la différence de productivité à leur moyenne des divers sols productifs semi-naturels (agriculture, forêts gérées...) de la planète. Ils sont déduits de la BdD GAEZ (Global Agro-Ecologique Zone) de la FAO, qui caractérise le potentiel productif des sols en se fondant sur les facteurs strictement quantitatifs d'une fertilité de type « économique » - <http://www.iiasa.ac.at/Research/LUC/GAEZ/index.htm>

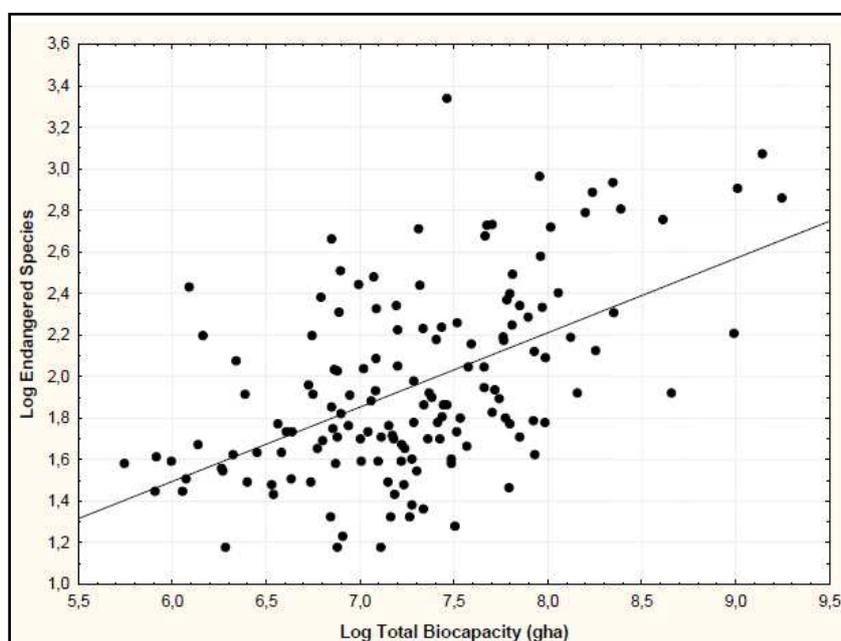
2.4 ... à une contradiction fondamentale avec la biodiversité

De nos premières recherches, personnelles et bibliographiques, il venait ainsi que l'empreinte écologique ne pouvait rendre compte de la « valeur ajoutée » des services des écosystèmes naturels, et qu'il n'existait par ailleurs pas d'index de biodiversité fiable susceptible de se fondre avec cette dernière.

Nous avons dès lors poussé plus loin notre recherche des rapports entre empreinte écologique et biodiversité. Parmi tous les auteurs qui ont cherché à répondre aux prescriptions de l'agenda de la « Convention sur la diversité biologique », dont ceux que nous avons cités, D. Vackar (2008) a aussi repris cette question à son compte, mais à l'envers cette fois. Il a cherché non pas à proposer un nouvel index de biodiversité, mais à établir une corrélation entre l'empreinte écologique existante et le niveau de biodiversité d'un territoire donné.

Jusqu'à quelques résultats remarquables pour notre problématique. Reprenons en effet le schéma de synthèse et la conclusion de son étude sur l'empreinte écologique et la biodiversité en République tchèque (Vackar, 2008) :

Figure 1 : 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).

Extrait de la conclusion de l'auteur : « *Les biocapacités nationales sont positivement corrélées à la (diminution de la) richesse en espèces, mesurée par le nombre d'espèces en danger comme approximation (de la biodiversité)... La biodiversité est liée à l'empreinte écologique principalement à travers la densité de population humaine et donc son niveau de consommation des ressources, mais d'autres facteurs pourraient être potentiellement pris en compte...* ».

Remarquons que ce n'est pas avec l'empreinte écologique en soi (passif de l'empreinte) que l'auteur a ici corrélié la biodiversité, mais avec la biocapacité (actif de l'empreinte), c'est-à-dire les espaces naturels entrés sous le contrôle direct de l'économie (agriculture, forêts gérées, ...).

Il établit ainsi que plus la biocapacité augmente, plus la biodiversité baisse, ce qui non seulement vérifie notre constat que les calculs de biocapacité ne sauraient prendre en compte la biodiversité, mais plus encore introduit le constat (à priori dramatique pour notre recherche) que celle-ci est « contradictoire » à la biodiversité. S'il existe tant soit peu une relation entre biodiversité et biocapacité selon l'empreinte, celle-ci n'existe que négativement !

2.5 ... puis à un modèle de développement soutenable contradictoire avec la biodiversité

En cherchant à démontrer une relation positive entre empreinte écologique et biodiversité, notre auteur a ainsi paradoxalement, démontré le contraire ! Que ce soit l'actif ou le passif de l'empreinte, ils sont dans tous les cas contradictoires à la biodiversité. Et cette conclusion devient fondamentale pour notre étude de la biocapacité potentielle des espaces naturels !

Nous avons déjà fait auparavant un autre constat remarquable : quand des terres agricoles sont converties à l'agriculture biologique, la mesure de la biocapacité (actif) des territoires n'augmente pas mais au contraire diminue. Nous avons plus tard pu interpréter que ceci était dû aux facteurs d'équivalence de l'empreinte, tirés de la BdD GAEZ de la FAO : la fertilité des terres est principalement mesurée en fonction de critères de productivité de type industriel, proportionnels à l'intensité énergétique des modes d'exploitation.

Ceci étant confirmé, il apparaît désormais que non seulement il n'existe pas d'indicateur de biodiversité que l'empreinte écologique serait susceptible d'intégrer dans sa mesure des actifs naturels, mais, plus encore, que cet outil de mesure, le plus synthétique jamais mis au point pour établir le bilan des relations homme-nature, apparaît au final comme l'outil de mesure de dimensions « contradictoires » à cette biodiversité.

Le modèle de « développement soutenable » que l'empreinte écologique est supposée soutenir s'avère ainsi contradictoire à la préservation de la biodiversité.

Toutes les recherches tendant à montrer et/ou à faire que l'empreinte écologique soit ou devienne cet outil susceptible de nous aider à gérer l'environnement comme « espace naturel », avec ses propriétés spécifiques de biodiversité fondant la valeur des actifs naturels, tiendraient ainsi du mirage collectif pur et simple !

Mais alors, qu'est-ce que la biodiversité ? Comment la mesurer ? Pourquoi a-t-on tant de difficultés à le faire ?

C'est en pénétrant dans les profondeurs de cette question que nous nous sommes progressivement confronté à **un obstacle théorique d'une ampleur considérable.**

2.6 ... et jusqu'au « mur » de la biodiversité !

2.6.1 Qu'est-ce que la diversité biologique ? Comment la mesurer ?

Citons quelques passages introductifs à la thèse de B.V. Raharinirina (2009) :

« 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 admise⁶ : « 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). »

Et quelques passages de la thèse de C. Da Cunha (2010) :

⁶ Définition officielle de la Convention pour la Diversité Biologique (CDB).

« 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 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 al., 2008). »

Mesurer la biodiversité de manière fiable, reproductible et comparable (critères premiers d'un index partagé), s'avère ainsi, d'une manière très générale, comme une tâche très difficile.

Mais plus près encore des questions qui nous préoccupent, la fertilité dans ses relations à la diversité biologique, c'est R. Chaussod (1996), qui dans son article de synthèse du numéro spécial de l'Inra consacré à la « qualité biologique des sols », nous apporte quelques réponses complémentaires quant à la mesure de la qualité/diversité biologique en matière de sols. Citons un large extrait de sa conclusion :

« On ne peut envisager d'agriculture durable sans chercher à préserver la qualité des sols. Les composantes biologiques, en interaction avec les propriétés physiques et physico-chimiques, participent très largement à la qualité globale du sol. La notion de composantes biologiques de la qualité des sols semble préférable à celle d'indicateurs biologiques, trop réductionniste. En tous cas, la « qualité biologique » d'un sol n'est pas une grandeur monodimensionnelle et ne peut en aucune façon se résumer à une seule détermination. Au contraire, il est important d'évaluer aussi bien des aspects quantitatifs (relatifs aux fonctions) que qualitatifs (relatifs aux populations). Si les premiers sont relativement bien maîtrisés, il n'en est pas de même pour les seconds. De nombreuses questions sont soulevées par la biodiversité et son rôle dans le fonctionnement et la stabilité des écosystèmes. Par ailleurs, identifier des variables à mesurer et mettre au point des méthodes de mesure ne suffit pas : il faudra acquérir de nombreuses références et établir des normes d'interprétation. Ces dernières sont forcément liées au type de sol et au système de culture. Des bases de données, reliant les indicateurs biologiques aux caractéristiques physico-chimiques des

sols et à leur mode de gestion, pourraient permettre d'utiliser les déterminations biologiques comme indicateurs précoces d'altération des sols, ou aider à choisir les différentes pratiques culturales en prenant en considération la durabilité des systèmes de production. Pour l'instant, les déterminations biologiques fiables qui sont à notre disposition restent très limitées. La biologie et l'écologie du sol représentent des domaines de recherche qui doivent impérativement se développer pour acquérir un caractère opérationnel en matière de gestion des sols. En d'autres termes, il est important de mieux connaître les traits essentiels de l'écologie du sol, en interaction avec les autres facteurs édaphiques, pour mieux gérer son fonctionnement, et en particulier prévoir et anticiper ses évolutions plutôt que les subir. Le sol est l'élément-clé des écosystèmes terrestres, et en particulier des agrosystèmes. Ce n'est pas une ressource renouvelable, mais un milieu vivant qui peut être altéré de façon irréversible par des interventions humaines inadaptées. Les systèmes de production durable dont nous avons besoin pour l'avenir ne peuvent s'envisager sans une utilisation « conservatoire » du sol. Une gestion « au plus près du biologique » est certainement la meilleure stratégie d'utilisation des sols sur le long terme ».

On ne peut que se féliciter de telles conclusions de la part de l'Inra ! Elles synthétisent un grand nombre de constats établis par ailleurs au sein d'un très large référentiel bibliographique international.

Elles confirment la « pertinence » du regain d'intérêt actuel pour une discipline fondée par le scientifique russe Vassili Vassilievitch Dokoutchaïev (1846-1903) à la fin du XIXe siècle, et depuis reléguée au magasin des accessoires : La pédologie. Elles confirment de même nos constats antérieurs sur les limites « quantitatives » de l'index GAEZ de la FAO utilisé dans les calculs de biocapacité, y compris les contradictions de cette dernière avec la biodiversité.

Précisant par ailleurs le problème actuel la biodiversité, ces conclusions nous amènent à faire un certain nombre de constats complémentaires aux précédents :

- La qualité biologique des sols (qui remplace la notion aujourd'hui discutée de fertilité), facteur primaire de la production du vivant dans la biosphère, est probablement le facteur le plus fondamental de la productivité des écosystèmes terrestres.
- Il existe une relation directe entre la qualité biologique et la diversité biologique, de l'une à l'autre et inversement.
- L'index de qualité/diversité biologique (biodiversité) devra être un index multidimensionnel, aux composantes tant quantitatives que qualitatives.

Prenons acte de ces nouveaux constats.

Ceci dit, en les élargissant au domaine entier de notre travail de thèse, et, plus loin encore, à la discipline « Economie écologique » dans ses fondamentaux, ils en amènent de nouveaux, beaucoup plus radicaux et difficiles à intégrer :

- Il ne saurait être question, en l'état actuel de nos connaissances, et avant « un certain nombre » d'années, de pouvoir établir un tel index de synthèse de qualité/diversité biologique, ou mieux encore de « production potentielle de vivant par les écosystèmes terrestres ».
- Il ne saurait donc être question de dresser un état autre que « quantitatif » (par exemple un état quantitatif des stocks différenciés de ressources naturelles autres que la biodiversité) de l'apport spécifique des « actifs environnementaux » des espaces naturels (mesure des services écosystémiques rendus) à l'économie et, à l'inverse, de dresser un état de synthèse qualitatif de la pollution engendrée par nos économies dans la sphère du vivant.

Au final, un « bilan écologique » intégrant la biodiversité (à la différence de l'empreinte écologique) serait donc en l'état actuel impossible à établir.

Nous devrions donc être portés à arrêter ipso facto notre travail de thèse sur l'empreinte écologique et les valeurs de l'écodéveloppement, étant donné que nous nous trouvons, avec la question de la biodiversité au sein du bilan écologique, au cœur du caractère fondamental des différents postulats de sa recherche.

Toutes choses qui semblent par ailleurs remettre en cause l'objectif fondamental de la discipline « économie écologique », qui consiste justement à établir, bien au-delà des seuls bilans quantitatifs de mesure des diverses pollutions (ce que tout le monde sait faire à peu près bien aujourd'hui), un « bilan de synthèse » crédible et efficace, un « compte rendu évaluatif » (et surtout utile pour l'action correctrice des politiques) des relations entre les écosystèmes naturels et les écosystèmes sous contrôle de l'économie humaine.

Et, last but not least, l'objectif premier du SEEA, qui semble avoir repris ces mêmes attendus à son compte, serait donc lui-même à remettre à plus tard, sauf son caractère de « catalogue des bonnes pratiques ».

Nous voici donc confrontés nous-mêmes, dans notre étude des alternatives aux limites de l'empreinte écologique, à des limites matérielles terriblement concrètes.

Certes pourrions-nous dire, à la lecture de R. Chaussod et des citations qui le précèdent, cette question de la « biodiversité » est trop récente pour que l'on puisse espérer des solutions immédiates. Et ce n'est plus malgré tout que l'affaire de quelques années avant que nous soyons en mesure de mettre au point de tels index de qualité/diversité biologique.

Mais derrière l'apparence immédiate, ces limites sont-elles vraiment matérielles, à la seule mesure des outils qui nous manquent ?

2.6.2 La biodiversité n'est-elle qu'une seule mesure physique ?

Nous découvrons progressivement, dans la trame des citations précédentes, que la biodiversité ne relève « pas que » d'une mesure physique de quantités physico-chimiques. Elle nous pose progressivement de nombreuses questions relevant de son rôle spécifique dans le fonctionnement et la stabilité des écosystèmes.

Nous découvrons qu'elle a un caractère multidimensionnel, participant de très multiples relations qualitatives s'établissant entre ses diverses composantes, que l'on ne saurait réduire à quelques mesures physiques.

Nous découvrons qu'avec les écosystèmes, la biodiversité se réfère à un milieu vivant dont le fonctionnement et les concepts sont des notions abstraites auxquelles il est difficile de donner une limite spatiale claire.

Et que si, dans la pratique, assimilant les écosystèmes à des entités spatiales tels que les lacs, les bassins versants ou les massifs forestiers, les écologues font des estimations en se référant à des indicateurs pouvant concerner la génétique, les espèces, les peuplements, la structure de l'habitat, etc., ils ont en réalité abusivement tendance à assimiler de tels indicateurs à une mesure de la biodiversité.

Nous découvrons au final que, quelle que soit la complexité de ses définitions et de sa mesure, la biodiversité apparaît comme synonyme du « vivant ».

Mesurer la biodiversité reviendrait ainsi à mesurer le vivant !

Mais quelle est la position des sciences physiques face au vivant ? Le vivant est-il seulement mesurable au sens de la physique ?

2.7 ... et à la question de la science face au vivant !

2.7.1 Le vivant est-il mesurable au sens de la physique ?

Cette question, qui revient à mesurer le caractère spécifique du vivant au sein d'un champ de forces que Wladimir Vernadsky, père de l'Écologie globale, nomme le « champ vital » de la Biosphère (Vernadsky, 1929), est un débat récurrent qui date de l'époque préindustrielle et prérévolutionnaire (mais certains le font remonter à l'époque d'Aristote), et qui émergea autour de la ... Physiocratie !

Il y eut en effet un moment, à l'orée du romantisme, où le concept d'utilité agricole des physiocrates, fondé sur la fertilité des sols, et donc d'abord sur le « travail de la nature » et les propriétés particulières de l'humus, sera repris dans ses bases physiques par un grand agronome, le pragmatique abbé Rozier (1734-1793), suivi dans ses travaux par un certain Jean-Jacques Rousseau⁷.

Cette recherche aboutira à un débat (qui prendra progressivement les allures d'une grande polémique) sur les vertus fertilisantes de l'humus (Sigaut, 1975, pp 98-134), et qui durera de 1780 à 1840 environ. Elle opposera les partisans (majoritairement français) des vertus du « royaume agricole⁸ » aux partisans libéraux (majoritairement anglo-saxons) des théories « physico-chimiques » relatives à l'« écobuage » et à la nourriture des plantes, qui anticipèrent les démonstrations de J. Von Liebig (1803-1873), ces dernières ayant soutenu au Royaume Uni la transition entre révolution agricole et industrielle.

Cette polémique illustre « sur le terrain » l'opposition farouche entre la théorie « vitaliste⁹ » de Paul-Joseph Barthez¹⁰ (1734-1806) pour laquelle le vivant n'est pas réductible aux lois physico-chimiques, et la théorie « mécaniste », dont les partisans, tels Jean-Baptiste de Lamarck (1744-1829) et Claude Bernard (1813-1878), militaient activement pour la réduction de la vie à des phénomènes physico-chimiques. Les mécanistes critiquaient notamment les vitalistes pour l'incompatibilité de leur doctrine avec les méthodes expérimentales qui, seules, donnent une valeur scientifique aux théories soutenues dans le domaine des sciences de la nature. Ce qui fut la raison précise pour laquelle la théorie de l'humus, scientifiquement indémontrable à l'époque, fut abandonnée, ouvrant de facto l'ère de l'agriculture industrielle. Ce qui n'était plus le cas en 1938 où plus de 1000 contributions l'avaient enfin démontrée (Waksman, 1938), fort malheureusement juste avant la seconde guerre mondiale, dont la sortie inaugura une nouvelle ère du développement agricole.

Ces différentes strates d'une même fracture illustraient l'opposition des modèles économico-agronomiques français et anglo-saxons, et la « partition » des premières grandes théories économiques de François Quesnay (1694-1774) et Adam Smith (1723-1790). Fracture radicale entre deux visions du futur économique derrière l'objectivité desquelles se dissimulaient les pratiques prédatrices de l'accumulation primitive du capital (Marx, *Le Capital*, livre I, huitième section).

Et c'est au cœur de ces grands clivages que vont advenir les révolutions américaines et françaises, qui « précipiteront » leur résolution, tant au profit de l'économie libérale que de la théorie mécaniste.

⁷ C'est probablement de cette fréquentation de l'abbé Rozier que Rousseau tira certaines de ses conceptions agricoles de la *Nouvelle Héloïse*.

⁸ Ce concept récurant de la physiocratie symbolise le modèle de développement qu'elle projetait alors pour la France, et que l'on retrouve parfaitement illustré par Rousseau (l'apogée de la physiocratie se situe vers 1758 avec la parution du tableau économique de Quesnay, Rousseau publie sa *Nouvelle Héloïse* en 1761).

⁹ Le mérite principal du vitalisme était de redonner son sens et son originalité à la vie, réduite à l'extrême depuis Descartes et la conception mécaniste de la vie qu'il avait imposée, en assimilant la vie organique à un automate infiniment compliqué, mais régi par les lois de la matière « inanimée ».

¹⁰ Les dates deviennent très importantes quand il s'agit de caractériser les grands courants de pensée qui parcourent notre société, à l'exemple de la défunte « pensée unique », raison pour laquelle nous les citons quand de besoin. On notera par exemple que l'abbé Rozier (la théorie de l'humus) et JP Barthez (le vitalisme), sont nés la même année 1734, et atteignent leur majorité intellectuelle dans ces mêmes années 1757-1759 qui forment la période critique de la formation de la doctrine physiocrate, alors discutée dans tout le royaume.

S'illustrant dans les succès de la nouvelle agriculture physico-chimique, l'une et l'autre instituèrent ainsi de concert les premières bases théoriques de la révolution industrielle, confiée à la transparente « main invisible » d'un nouveau marché dont le succès, à priori « mécanique », fut en réalité fondé sur « l'invisible captation primitive » du « capital fertilité de production » (Reboul, 1987) accumulé au long des siècles par les divers travailleurs de la terre¹¹.

2.7.2 Les deux premiers principes de la thermodynamique...

Mais le véritable triomphe de la théorie mécaniste n'advient qu'au XIXe siècle, avec l'arrivée de la « thermodynamique », qui semblera clore définitivement les grandes questions du siècle précédent.

L'histoire de la thermodynamique nous apprend que, après Descartes, Lavoisier, Joule et quelques autres, c'est Sadi Carnot¹² (1796-1832) qui inventa formellement la thermodynamique en élaborant les concepts qui allaient constituer le « second principe », dit aussi principe de Carnot. Mais c'est surtout Rudolph Clausius (1822-1888) qui après lui, en même temps qu'il créa le concept d'entropie, formula dans son article fondateur (Clausius, 1865) la première synthèse des deux lois fondamentales de l'univers correspondant aux deux théorèmes principaux de la théorie mécanique de la chaleur (les deux premiers principes de la thermodynamique) :

- 1 L'énergie de l'univers est constante.
- 2 L'entropie de l'univers tend vers un maximum.

Nés juste après la révolution française, dans la mouvance des débats entrevus qui précédèrent la révolution industrielle, ces deux principes, les formules mathématiques de calcul du travail mécanique et de la chaleur qui accompagnent leur démonstration, auront des répercussions considérables dans le développement du système industriel occidental, et donc de son économie.

Pour faire simple, l'entropie mesure la perte de capacité de travail du potentiel énergétique d'un matériau quelconque (par exemple un kg de bois), lors d'un changement de phase ou d'une « transformation » (traduction du terme grec « entropie ») de ce matériau (combustion du bois).

C'est en quelque sorte un « taux d'usure » interne de l'énergie dite « libre » (ou utile) de ce matériau qui mesure « négativement » sa capacité de travail en mesurant sa perte d'efficacité.

Comme, selon le premier principe, l'énergie est constante, cela veut dire que l'énergie totale issue du matériau, égale à son contenu en chaleur plus sa capacité de travail ($U = Q + W$), reste constante, et donc qu'à toute diminution de sa capacité de travail (énergie utile) correspondra une augmentation de chaleur (énergie inutilisable).

L'entropie devient ainsi une variable universelle mesurant la « perte de qualité » d'une énergie considérée constante dans un univers de masse constante. Ce qui n'est pas rien car l'entropie devient en quelque sorte une unité de mesure (thermodynamique) de la mort, serait-elle progressive.

Reconnaissons que ce concept est très difficile à comprendre, car si l'énergie reste constante, qu'est-ce donc qui a disparu lors de cette usure de l'énergie libre/utile ? Qu'est-ce donc qui rend l'énergie utile ? et comment peut-on le mesurer ? Nous aurons l'occasion dans ce travail d'étudier cette question plus en détail.

2.7.3 ... et puis ce caractère très spécial de l'entropie

L'entropie est un concept vraiment très spécial. En effet, susceptible de mesurer la diminution de la capacité de travail de toute chose dans l'univers (et donc le rapprochement de sa disparition),

¹¹ Il avait fallu « casser » la théorie (vitaliste) des vertus de l'humus pour, dès lors qu'elles seraient devenues « invisibles », d'autant mieux pouvoir se les approprier. Ce que l'on pourrait nommer « l'invisible mensonge de la main invisible ».

¹² Sadi est le fils très soumis de Lazare Carnot, brillant mathématicien et ingénieur, auteur en 1783 d'un *Essai sur les machines en général* ! Lazare fut élu à l'Assemblée constituante de 1789 puis à la Convention, et vota la mort de Louis XVI.

elle ne saurait cependant mesurer sa capacité de travail « en soi » (et donc son « taux de vie »), et d'autant moins celle d'un matériau quelconque¹³. Ceci est dû à un autre caractère fondamental de l'entropie : elle va toujours dans le même sens (définissant ainsi la « flèche du temps »), l'augmentation ! C'est ce que l'on nomme « l'irréversibilité entropique¹⁴ ».

Elle ne connaît pas de contrepartie « officielle¹⁵ », à partir de laquelle nous pourrions dire, par exemple : quand le travail augmente, la chaleur diminue. Comme si la capacité de travail, ne pouvait aller que dans un seul sens, la « disgrégation » (voir note 13), ne pouvait connaître de rémission, de retour en arrière, voire connaître une éventuelle possibilité de « création ». La capacité de travail, seule mesure officielle des qualités de la nature selon la thermodynamique, est un donné, un héritage universel, qui ne suppose aucune « genèse accessible à nos sens », aucune « amélioration », aucune possibilité de « revenir dessus ».

Il y a eu les sept jours de la création, une certaine semaine, et depuis ... nous n'arrêterions plus de chuter, un point c'est tout !

Depuis, rien que l'entropie et encore l'entropie. Nous pourrions nommer finalement ce second principe : le principe du « pessimisme universel », face auquel tant l'univers lui-même que la nature, et d'autant plus l'humanité, restent absolument impuissants.

Ce principe d'entropie est si affirmatif, dans son caractère de (sur)puissance, qu'un Sir Arthur Eddington a pu proclamer dans ses Gifford Conférences de 1927 (Georgescu-Roegen, 1979) : « *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 humiliation¹⁶ ».*

Ce qu'un Albert Ducrocq a nommé « Le totalitarisme entropique » (Ducrocq, 1989).

Nous citerons ici François Bonsack (Bonsack, 1961, p. 89 et suivantes), auquel on doit une synthèse globale sur la question de l'entropie (et de sa mesure), dans une thèse de doctorat fort remarquée par les grands théoriciens de l'information, à l'exemple de Bruno Lussato (Lussato, 1987) :

« Le premier principe de la thermodynamique est en quelque sorte un principe parménidien, c'est un principe d'éternité, d'immuabilité : quoiqu'on fasse, l'énergie se conserve, elle est indestructible.... Le second principe introduit dans la physique un élément historique, un élément de drame. Il est un principe de décadence, de ruine et de mort qui d'ailleurs nous blesse au plus profond de nous-mêmes. Que de tentatives ont été faites pour échapper à cette inéluctable dégradation ? On a imaginé des théories subtiles dans lesquelles l'entropie restait constante ... des processus remontant la pente de l'entropie, des mouvements perpétuels de seconde espèce à l'échelle cosmique... ».

Et un peu plus loin, il tente de faire un point : « *Il y aurait alors dans notre univers une quantité d'énergie constante qui, elle, demeurerait immuable. Il y aurait d'autre part une certaine quantité de nég-entropie, d'« ordre » sous la forme d'énergie ordonnée, d'énergie utilisable, d'énergie libre. **Ce capital de nég-entropie ne pourrait augmenter : le second principe l'interdit.** Nous savons*

¹³ Alors qu'Einstein nous donne la valeur du contenu énergétique total d'un matériau en rapport avec sa masse ($E=mc^2$), l'exergie (de formule $H-TS$) mesure sa capacité de travail, mais seulement sous une forme différentielle entre deux états de la transformation de ce matériau. On connaît par ailleurs la capacité de travail des matériaux énergétiques (bois, énergies fossiles ...) à travers leur Pouvoir Calorifique (supérieur ou inférieur), mesuré de manière empirique lors d'expériences de combustion.

¹⁴ Concernant ce caractère irréversible de l'entropie, et pour éviter certaines confusions dues à la réversibilité potentielle du changement d'état de certains corps, et donc la réversibilité potentielle « partielle » de l'entropie « totale » de ces corps, nous soulignerons la différence de nature (établie par Claudius dans son article [Claudius, 1865, pp 389-392]) entre les grandeurs « Y » (valeur de transformation du contenu de la chaleur) et « Z » (disgrégation), ensemble constitutives de l'entropie « S ». On s'y reportera si besoin. Cette réserve étant exprimée, nous retiendrons ici le sens le plus commun de l'entropie.

¹⁵ Beaucoup d'auteurs ont insisté ces dernières décennies sur la notion « d'entropie négative », ou « néguentropie », ou « nég-entropie », mais nous découvrirons que cette notion s'inscrit « parfaitement » entre les bornes du second principe.

¹⁶ Notons que Sir Eddington fait cette déclaration l'année même de la parution en France de *La Biosphère*, de Vernadsky.

d'autre part qu'il diminue constamment... Deux constatations s'imposent :

- *Première constatation : ce capital d'ordre, nécessairement fini, va un jour s'épuiser, puisque nous le grignotons sans cesse et puisque nous ne pouvons pas le renouveler.*
- *Deuxième constatation, qui est plutôt une question : D'où vient ce capital d'ordre ? Comment s'est-il créé ? »*

Nous ne saurions trop insister sur le caractère fondamental de ces constats.

Son ouvrage a 50 ans, mais peut-être notre auteur, s'il vit encore, peut-il voir de ses yeux à quel point son premier constat a été depuis partout vérifié à l'échelle planétaire. D'abord le modèle de Forrester (inventeur de l'ordinateur), qui a représenté, avec son « modèle dynamique du monde », les limites de la croissance dans un monde « fini » (Forrester, 1971), et à sa suite le fameux « The Limits to Growth », de Donella et Dennis Meadows (Meadows, 1972), deux contributions qui justifiaient presque à elles seules la première Conférence des Nations Unies sur l'Environnement et le Développement (CNUED, Stockholm, 1972). Ensuite les prises de conscience actuelles de plus en plus critiques quant aux limites de nos réserves planétaires d'énergie, de matière... sans parler des nouvelles limites globales imposées par le changement climatique.

Quant à son deuxième constat, poursuivons les questionnements de notre auteur sur ce capital d'ordre supposé par le second principe : « *On peut répondre : il a toujours été là, de toute éternité. Mais alors un autre problème se pose : s'il existe de toute éternité, pourquoi n'est-il pas déjà épuisé depuis longtemps ? Il faudrait alors admettre qu'il soit resté quiescent pendant toute une éternité et qu'il n'ait commencé à se dégrader que depuis un temps fini. Mais pour quelle raison aurait-il subitement commencé à se dégrader après une éternité de repos ? Et avant ? Qu'y avait-il avant ? - En ce qui concerne le second principe, rien de ce que nous connaissons en physique ne nous permet de supposer qu'une évolution inverse ait précédé la nôtre, au cours de laquelle les stocks de nég-entropie que nous consommons se seraient constitués. Tout se passe comme si un stock unique, dont l'origine reste mystérieuse (peut-on même parler d'origine ?) était utilisé définitivement, irrémédiablement, irréversiblement. Nous n'avons pas les moyens, pour le moment, de satisfaire plus complètement notre curiosité...Voilà comment se pose le problème cosmologique **si le second principe ne comporte pas d'exceptions.** »*

Et il est en effet tout à fait extraordinaire de constater combien cette puissance du second principe qui, notons-le, depuis sa naissance, à l'aube de la révolution industrielle, domine la totalité du monde physique créé par l'homme, se constitue sur un totalitarisme qui n'admet aucune exception. Mais comme le dit Bonsack : « *Un principe est où il n'est pas. S'il comporte des exceptions, ce n'est plus un principe* ».

Il ajoutera : « *Cette question des exceptions au second principe peut paraître un peu saugrenue !* ».

Elle semblait l'être en effet il y a 50 ans (mais seulement dans le monde industriel de sa domination, car nous verrons que ce ne fut pas le cas en dehors). Mais aujourd'hui, dans une société qui comme la nôtre a atteint, avec la limite de ses ressources, les limites de son « modèle d'existence », cette question prend au contraire désormais **une phénoménale valeur d'actualité.**

2.8 Objectif de travail : existe-t-il une exception au principe de Carnot ?

Cette (longue) succession des éléments de notre problématique étant exposée, nous pouvons en déduire un constat d'ensemble :

Une unité de mesure scientifiquement démontrable de la qualité et/ou de la diversité biologique, ces dernières vues comme des constantes du « champ vital de la biosphère », selon Vernadsky¹⁷ (1929), est non seulement très difficile à mettre au point, mais constitue de surcroît, sur le plan

¹⁷ Nous insistons sur ce « selon Vernadsky », car toute la littérature écologique, dans laquelle nous comprenons l'économie écologique, témoigne de fortes contradictions quant aux fonctions et limites spécifiques de la biosphère. Et c'est justement en nous référant aux définitions de Vernadsky que nous serons amenés à pouvoir proposer une clarification fondamentalement utile à notre démonstration.

théorique, une « source nette de néguentropie¹⁸ » formant une exception au second principe de la thermodynamique, exception qui, « par principe », ne saurait exister¹⁹.

Car ce second principe a la vie « terriblement » dure. Nous allons voir en effet que, s'il existe, à la suite des interrogations du Vitalisme, une histoire de la quête de cette exception qui parcourt tout le XXe siècle, et au long de laquelle de nombreux chercheurs ont voulu identifier les sources et mettre au point les outils de mesure d'une « activité néguentropique du vivant », chaque fois pourtant le second principe confirmera au final sa domination.

Il a en effet été à ce jour démontré (nous allons faire une brève revue de cette démonstration dans le prochain chapitre) que, si le vivant, en tant que « système ouvert », fabrique bien de la néguentropie (capital d'ordre de la croissance organique), ceci ne constitue qu'un « moment » qui n'est rendu possible qu'aux dépens d'une consommation de la néguentropie du milieu extérieur, dans lequel il rejettera ses déchets d'activité, à savoir son entropie interne²⁰. Le bilan, si bilan il y a, se fera au final en faveur du second principe, à savoir une augmentation de l'entropie totale. Toute production de vivant, à quel titre que ce soit, ne constituerait donc qu'une nouvelle augmentation de l'entropie universelle.

Comment dès lors serait-il possible d'établir un quelconque « bilan écologique » (réaliste, fondamental, catégorique, reconnu, reproductible, comparable...) dans lequel les activités naturelles seraient opposables aux activités humaines, quand les écosystèmes naturels, eux aussi générateur d'entropie, ne sauraient contrecarrer, compenser, absorber... le flot de production d'entropie de l'économie ? Leur unité de mesure serait-elle commune, l'entropie des deux sphères d'activité (naturelles et humaines) se cumulera dans ce bilan, plutôt que l'entropie de l'une se déduira de la néguentropie de l'autre. Ce qui nous donnera une démonstration vide de sens, de surcroît déjà circonscrite par le principe de Carnot.

C'est ainsi que le second principe vient « par principe » confirmer l'impossibilité de l'existence d'un quelconque index de biodiversité, vital par nature, comme « mesure du vivant » !

Ces limites expliquent fort bien la permanence de visions parfaitement contradictoires du développement durable/soutenable (Loiret, 2008). Elles expliquent par ailleurs les propositions troubles, imprécises, statiques et conservatrices de l'écologie politique. Elles expliquent finalement pourquoi Georgescu-Roegen, en formulant son « quatrième principe de la thermodynamique », a adopté une posture politico-scientifique fondamentalement pessimiste qu'il dénommera la « Décroissance » (Georgescu-Roegen, 1979 ; Cleveland, 1999).

Existe-t-il dès lors une alternative à notre problématique fondamentale ?

Elle supposerait une nouvelle hypothèse d'exception au second principe, compatible avec le champ théorique de la thermodynamique, susceptible d'apporter un début de réponse à la question de Bonsack : « Comment les stocks de néguentropie se sont-ils constitués ? ».

Découvrir l'existence d'une telle hypothèse et de sa démonstration est notre présent objectif de travail. Il va nous engager dans le déroulé préalable de cet historique des recherches d'exception au second principe, au cours duquel nous affinerons l'objet de notre recherche, qui devra d'autant mieux nous mettre sur la bonne piste. Une fois celle-ci trouvée, nous l'examinerons alors dans le plus grand détail.

Ce n'est qu'ensuite seulement que nous pourrons envisager la possibilité, d'une mesure de la biodiversité comme source positive de néguentropie, et de l'établissement d'un « bilan thermodynamique » des relations homme ↔ nature au sein de la biosphère, dont l'approfondissement fera l'objet de nos prochains cahiers de recherche.

¹⁸ Nous entendons par là une néguentropie productrice de « capital d'ordre », qui, à la différence des systèmes ouverts (voir juste après), ne serait pas produite via une néguentropie « préexistante » du milieu ambiant.

¹⁹ Toute exception sera donc de fait taxée de vitalisme et rejetée à ce titre dans les bas fonds de la mystique préindustrielle.

²⁰ Principe que nous nommerons plus loin, pour les « seuls » besoins de notre exposé, le « principe SBVB ».

3. A la recherche d'une exception au principe de Carnot

On notera que le titre ci-dessus suppose qu'il « pourrait », peut-être, c'est à voir, on ne sait jamais, une ou plusieurs exceptions au principe de Carnot.

Mais reprenons l'expression de Bonsack : « *Un principe est où il n'est pas. S'il comporte des exceptions, ce n'est plus un principe* ».

Ce qui, face à l'évidence de l'entropie, suppose de résoudre une « énigme » selon laquelle l'entropie supporterait une exception telle qu'elle lui garde tout son caractère de « principe essentiel ».

Nous comprendrons en fait progressivement, que, ce principe étant unique, il ne saurait y avoir, face à lui, qu'une seule et unique exception, qui, aussi « contradictoire » qu'elle lui soit, ne remettra pas pour autant en cause sa propre existence.

3.1 Le point de vue « thermodynamique »

Il peut être difficile de comprendre, pour qui n'a pas étudié la thermodynamique ou la théorie de l'information, l'importance qu'ont pris les deux premiers principes dans l'histoire scientifique et économique qui suivront leur formulation. Quand un Sir Arthur Eddington proclamait que « (...) *la loi selon laquelle l'entropie augmente toujours occupe la position suprême parmi les lois de la nature* », il reste encore très humble, car cette loi occupe en fait la position suprême parmi toutes les lois physiques de l'économie, au sens large, du vingtième siècle, fondée sur l'énergie et sa productivité. Et comme en fondant ce concept d'entropie, Clausius ne déclarait pas ses domaines d'exception éventuels, son applicabilité apparaîtra bientôt tellement « universelle » qu'il enfermera dans ses limites toute la pensée scientifique de la physique classique, tout comme Descartes en avait fondé la rationalité.

Le second principe divise en quelque sorte l'univers en deux, la création (la genèse) et le créé comme résultat de cette genèse. Et comme la civilisation occidentale fut baignée depuis ses origines dans l'état de fait d'une création (divine) qui n'admettait pas de remise en cause, on peut comprendre que la thermodynamique, née aux alentours de la révolution française après 1800 ans de domination biblique, portait en elle des considérations reprenant à leur compte cet état de fait d'une humanité qui n'avait pas à se poser de questions sur les origines, le pourquoi et le comment d'une création « mise tout entière à sa disposition ».

Ce qui était au fond anti-scientifique, anticartésien et parfaitement « irrationnel », et se transforma de fait en paradoxe. Après que les premiers économistes eurent affirmé que les dons de la nature étaient inépuisables, on posa désormais la nouvelle affirmation définitive antinomique de la première : le créé antérieur, ce don de ... (on ne se pose même plus la question tant ce « donné » s'impose comme une évidence), il ne peut « que » s'user et s'épuiser.

Et ce qui ne manquera pas de générer une cascade de réactions et de remises en causes qui s'étaleront tout au long du vingtième siècle. On pourrait presque imaginer une histoire scientifique du XXème siècle à partir des propositions théoriques qui viendront soit faire opposition, limitation ou exception au second principe, soit l'élargir ou le généraliser. Elles fourniront dans tous les cas les bases de recherches et de découvertes parmi les plus fertiles de ce siècle.

Nous examinerons ici la question de cette quête d'exception du strict point de vue des contributions qui, cherchant à « contredire et/ou préciser²¹ » le principe de Carnot, aboutiront finalement à une plus grande généralisation des deux premiers principes de la thermodynamique.

²¹ Cette définition volontairement ambiguë veut refléter que c'est bien souvent en voulant fonder des contradictions ou exceptions que les chercheurs approfondirent le sujet, pour finalement l'enrichir et se rendre à ses « principes ».

3.1.1 Le démon de Maxwell (1831-1879)

Il y eut d'abord le « démon » de Maxwell, le grand physicien, qui, par une « expérience de pensée » (une expérimentation essentiellement conceptuelle, comme celle du chat de Schrödinger) réagissait en 1872 à Claudius. Citons Bonsack citant lui-même Maxwell (Bonsack, p. 90) : « *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 un 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.* »

Arrêtons-nous sur ce que dit Maxwell. Il suppose que le mystère (et la puissance) du principe d'entropie, qui mesure le « désordre interne » de l'arrangement moléculaire des corps, ne réside que dans les limites de la science de son époque, incapable d'examiner l'infiniment petit, et donc les causes réelles de ce dés-ordonnement interne. Et que, peut-être, on trouvera bientôt les moyens de faire revenir cette entropie en arrière. Ce qu'il se permet donc d'imaginer dans la suite de son texte : « *Mais si nous concevons un être dont les facultés seraient si aiguës 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.* »

Et ce démon aux facultés si aiguës va effectivement troubler pendant près de 80 ans les tenants d'une affirmation irréfutable du second principe. Il y aura même eu en 1888 la « Machine de Gouy », et son mouvement brownien (mouvement perpétuel), pour venir confirmer l'intuition de Maxwell.

3.1.2 L'entropie de Boltzmann (1844-1906)

Après Carnot et Claudius, Ludwig Boltzmann, physicien autrichien et père de la physique statistique donnera sa formule de calcul quasi définitive à l'entropie selon la thermodynamique : $S = k \log W$ (plus tard réécrite : $S = K_B \ln \Omega$), qui exprime l'entropie S en fonction du nombre W (ou Ω) de microétats du système, avec k (ou K_B) représentant la constante de Boltzmann.

Selon Prigogine (1993), Boltzmann est le premier scientifique à affronter le paradoxe du temps. L'apport fondamental de sa formule fut en effet de donner (grâce au calcul de l'entropie croissante), une justification dynamique de la « flèche du temps » là où on ne pouvait la déduire de la physique classique, elle-même fondée sur l'équivalence entre passé et futur. Là où la physique classique s'intéressait aux horloges, comme modèles réduits de la simplicité des mouvements planétaires et de la gravitation universelle, la thermodynamique pouvait dorénavant introduire une étude des nuages, comme allégorie des saisons qui changent et des générations humaines qui se succèdent, irréversiblement, et toujours dans le même sens !

Ses théories, relativement discréditées durant sa vie, seront plus tard remises à l'honneur par les découvertes de Max Planck et d'Albert Einstein.

3.1.3 Schrödinger (1887-1961), l'entropie négative et le code génétique

Premier à tenter de formuler en quoi le vivant « pourrait » faire exception au second principe, c'est en réfléchissant, dans « Qu'est-ce que la vie ? » (Schrödinger, 1944), sur la question de l'entropie face au vivant, que le physicien autrichien Erwin Schrödinger, grand théoricien de la physique « quantique », va reprendre à son compte le concept d'« entropie négative » (nous

viendrait-il de Boltzmann ?), dont il reconnaît n'être pas l'inventeur (Schrödinger, 1944, p. 133). Il va s'en servir pour établir un « pont » entre la physique statistique de Boltzmann (loi des grands nombres) et les lois d'organisation des molécules complexes du vivant (une loi des petits nombres ?).

Sa réflexion originelle est la suivante (Schrödinger, 1944, pp. 127-129) : « *Comment l'organisme vivant retarde-t-il la décadence ? La réponse est évidente, en mangeant, buvant, respirant et (dans le cas des plantes) en assimilant. Le terme technique est métabolisme. Le mot grec (...) signifie changer ou échanger. De quel échange s'agit-il ? A l'origine, l'idée sous-entendue est sans doute un échange de substance... Que l'échange de matière puisse être la chose essentielle est une absurdité. N'importe quel atome d'azote, d'oxygène, de soufre, etc., vaut autant que n'importe quel autre de son espèce : que pourrait-on gagner par un pareil échange ? Pendant un certain temps, dans le passé, on satisfait notre curiosité en nous disant que nous consommons de l'énergie... Il est inutile de dire que, pris littéralement, cela est tout aussi absurde. Pour un organisme adulte le contenu énergétique est aussi stationnaire que le contenu matériel (Note : il s'agit de la loi de conservation de l'énergie (et de la masse) selon le premier principe de la thermodynamique). Comme, incontestablement, une calorie quelconque vaut autant qu'une autre, on ne voit pas comment un simple échange pourrait servir. Quel est donc ce précieux quelque chose, incorporé à notre nourriture, qui nous sauve de la mort ? La réponse est facile. Tout processus ou événement, ou développement - appelez-le comme vous voulez - en un mot tout ce qui se passe dans la nature, signifie un accroissement de l'entropie de la partie du monde où l'événement se produit. Ainsi un organisme vivant accroît constamment son entropie - ou, pourrait-on dire, crée de l'entropie positive - et ainsi tend à se rapprocher de l'état dangereux d'entropie maxima, qui est la mort. Il ne peut s'en maintenir éloigné, c'est-à-dire rester en vie, qu'en soutirant continuellement au milieu environnant de l'entropie négative, ce qui est en réalité quelque chose de très positif, comme nous allons le voir immédiatement. Donc un organisme se « nourrit » d'entropie négative. En d'autres termes, pour nous exprimer moins paradoxalement, la chose essentielle en métabolisme est que l'organisme réussisse à se débarrasser de toute l'entropie qu'il ne peut s'empêcher de produire tant qu'il vit. »*

Mais complétons là de petites précisions que nous aurons l'occasion de reprendre.

Schrödinger (1944, pp. 131-132) : « *Comment pourrions nous exprimer en fonction de la théorie statistique la merveilleuse faculté que possède un organisme vivant de ralentir sa chute vers l'équilibre thermodynamique, la mort ? Nous l'avons déjà dit : « il se nourrit d'entropie négative », comme s'il attirait vers lui un courant d'entropie négative afin de compenser l'accroissement d'entropie qu'il produit en vivant et se maintenir ainsi à un niveau d'entropie stationnaire et suffisamment bas... Ainsi le mécanisme grâce auquel un organisme se maintient stationnaire à un niveau assez élevé d'ordre (= niveau assez bas d'entropie) consiste réellement en ce qu'il absorbe continûment de l'ordre à partir du milieu environnant. Cette conclusion est moins paradoxale qu'elle ne le paraît à première vue. On pourrait plutôt lui reprocher d'être banale. En effet, dans le cas des animaux supérieurs, nous connaissons assez bien le type d'ordre dont ils se repaissent, notamment l'état extrêmement bien ordonné de la matière dans les composés organiques plus ou moins complexes qui leur servent d'aliments. Après s'en être servis, ils les rendent sous une forme très dégradée - mais pas complètement pourtant puisque les plantes peuvent encore les utiliser. **Celles-ci, bien entendu, reçoivent de la lumière solaire leur puissante provision « d'entropie négative ».*** »

Nous reviendrons beaucoup plus loin sur l'ensemble de ce texte, et plus bas sur la phrase que nous avons mise en gras.

Retenons en attendant que pour Schrödinger l'entropie négative est susceptible de caractériser les capacités d'auto-structuration des êtres vivants à partir de la « forme qualitative » (et non pas la quantité) de l'énergie (l'énergie libre) consommée dans leur nourriture. Elle rendrait plus exactement compte de la force de cohésion (forces solidifiantes de Heitler-London selon Schrödinger) entre les atomes des molécules vivantes, vues comme des solides « a périodiques » radicalement différents des solides inertes (solides périodiques) et de leurs molécules.

Ce concept aidera Schrödinger à caractériser les molécules complexes du vivant au long d'une réflexion qui le mènera à formuler les premiers principes du « code génétique ».

Au final, Schrödinger se rattache à une définition « thermodynamique » du vivant venant infirmer l'entropie statistique de Boltzmann, mais venant confirmer cependant le principe de Carnot.

Il a établi un principe de « production d'ordre (néguentropique) à partir d'un ordre (néguentropique) antérieur », qui serait réellement suivi la par la nature.

Schrödinger (1944, p 140-141) : « (...) *le comportement de la matière vivante dont les caractères les plus frappants sont visiblement basés, en grande partie, sur le principe de « l'ordre par l'ordre ».* »

Brillouin reprendra ces mêmes concepts pour les rapporter à la question de l'information (voir plus loin). Toutes choses qui établiront un lien très étroit entre le code génétique et la théorie de l'information.

Mais en aucun cas Schrödinger n'a établi un principe de « création d'ordre » (néguentropique) à partir du « désordre » (entropique).

Notre exception recherchée est résolue chez lui grâce à la **phénoménale éclipse** d'une production solaire d'entropie négative que les plantes n'auraient qu'à attraper, selon un processus à ce point évident qu'il n'y a d'évidence aucun intérêt à se pencher dessus. Vous voulez de l'entropie négative ? Il suffit seulement de vous pencher dans les champs pour la ramasser (ce qui est vrai d'ailleurs) ! Au final, flux d'énergie solaire et stock d'énergie libre seraient pratiquement identiques, ce qui est fort de café pour un physicien de cette envergure.

Car Schrödinger a bien dit : « (elles)... *reçoivent de la lumière solaire leur puissante provision d'entropie négative* », ce qui, sémantiquement, suppose que les plantes, ces feignantes, n'ont rien à faire d'autre qu'à l'attraper et dire merci au soleil.

Le soleil envoie de l'entropie négative ? La Lune pourtant, et bien d'autres planètes avec elle, reçoit les mêmes flux solaires que la Terre depuis des milliards d'années, quand elle est dans sa matière totalement inerte et que l'autre porte la vie. N'y aurait-il donc aucune différence entre les deux planètes ?

Nous posons ici la question primordiale de « l'autotrophie » !

Comment en effet Schrödinger a-t-il pu ainsi observer à ce point comment l'entropie négative était dépensée, sans se poser, a priori, la question de sa production ? Ainsi Schrödinger en son temps aurait parfaitement illustré, comme tant d'autres avec lui, le syndrome de Bonsack d'une origine mystérieuse en même temps qu'évidente d'un stock de néguentropie que nous n'avons plus qu'à dépenser, serait-ce de la manière la plus économe possible.

3.1.4 Théorie de la communication et entropie négative selon Wiener (1894-1964)

Norbert Wiener, le père de la Cybernétique (vue comme une théorie de la communication), décrira l'entropie « négative » comme une « traduction physique » de l'information. Il nous précise ainsi sa conception de l'entropie de l'information (Wiener, 1950) : « *Les messages sont eux-mêmes une forme de « modèle » (pattern) et d'organisation. En effet, il est possible de considérer les séries de messages comme ayant une entropie à l'égard des séries d'états du monde extérieur. De même que l'entropie est une mesure de désorganisation, l'information fournie par une série de messages est une mesure d'organisation. En fait, il est possible d'interpréter l'information fournie par un message comme étant essentiellement la valeur négative de son entropie, et le logarithme négatif de sa probabilité. C'est-à-dire, plus le message est probable, moins il fournit d'information. Les clichés ou les lieux communs, par exemple, éclairent moins que les grands poèmes.* »

3.1.5 Théorie de l'information et entropie de Shannon (1916-2001)

La théorie de l'information est une théorie probabiliste permettant de quantifier le contenu moyen en information d'un ensemble de messages, dont le codage informatique satisfait une distribution statistique précise. Connue pour en être le père fondateur, Claude Elwood Shannon

va utiliser la théorie probabiliste pour définir une unité de mesure de l'information en lui appliquant le concept d'entropie, et en lui définissant une formule (l'entropie de Shannon) à partir de la notion de « bit », qu'il est le premier à populariser.

Mais l'entropie de Shannon et l'entropie négative de Wiener, avec qui il collaborait, ne sont pas contradictoires malgré les apparences, car Shannon peut adopter un signe négatif pour son entropie.

3.1.6 Contribution de Léon Brillouin (1889-1969)

Léon Brillouin est un physicien franco-américain issu d'une grande lignée de scientifiques (son père et son grand père furent professeurs au Collège de France). Il a joué un rôle important dans l'introduction en France de la mécanique quantique.

3.1.6.1 Le pont entre entropie thermodynamique et entropie de l'information

A partir des avancées de la thermodynamique et de la théorie de l'information, il publie en 1956 « Science and Information Theory » (traduction française en 1959), où sont examinées les relations entre ces deux disciplines. Il adopte un point de vue de physicien (comme Schrödinger) et fait le lien entre l'entropie informationnelle de Shannon et l'entropie statistique de Boltzmann.

3.1.6.2 La nég-entropie et le principe de Carnot généralisé

Il reprend dans cet ouvrage le concept d'entropie négative déjà utilisé par Schrödinger et Wiener et s'en attribue une forme de paternité en le nommant « nég-entropie ». Voici comment il résume sa position (Bonsack, 1961, p 101) :

« L'entropie thermodynamique mesure le manque d'information concernant un certain système physique. Chaque fois qu'une expérience est réalisée en laboratoire, elle est payée par un accroissement d'entropie, et un principe de Carnot généralisé établit que le prix payé en accroissement d'entropie doit toujours être supérieur à la quantité d'information obtenue. L'information correspond à de l'entropie négative, une quantité pour laquelle l'auteur a créé le mot nég-entropie. Le principe de Carnot généralisé peut donc être appelé le principe de nég-entropie de l'information. »

3.1.6.3 La réfutation du démon de Maxwell

C'est à partir de ce principe de Carnot généralisé que Brillouin cherchera à réfuter le « démon de Maxwell » en lui trouvant une solution correspondant à ce principe de Carnot généralisé. Remarquant que le démon avait besoin de lumière dans son récipient pour repérer les molécules les plus rapides et les isoler des autres, il en déduisit qu'il avait besoin d'énergie, donc une source de basse entropie forcément puisée dans le milieu extérieur, pour obtenir son information et baisser l'entropie du récipient. Brillouin établissait ainsi une relation entre la nég-entropie et le niveau d'information.

Mais cette réfutation ne fut pas pertinente au point de boucler la polémique et « trancher le débat » des exceptions au second principe. La question de l'« exception du vivant » va bien au contraire s'amplifier tout au long de la seconde moitié du XXe siècle

3.1.7 Von Bertalanffy (1901-1972) et la théorie générale des systèmes

C'est en parallèle ou en marge des travaux précédents, qui se distinguent peu ou prou de la « physique classique », que Von Bertalanffy va développer ses propres réflexions au sein d'une théorie générale susceptible d'unifier des conceptions scientifiques de plus en plus différenciées.

Reprenons à Von Bertalanffy quelques grands concepts et définitions de sa théorie générale (Von Bertalanffy, 1973, pp. 35-40) pour en tenter une petite synthèse utile à notre propos.

Von Bertalanffy décrit la science « classique » comme celle qui cherche à décrire les phénomènes observables en les réduisant à un jeu d'unités élémentaires étudiables indépendamment les unes des autres. Puis il dit le besoin crucial et définit les contours d'une nouvelle science de la totalité qui observera des phénomènes globaux non réductibles à des événements locaux, et qui décrira les principes d'organisation et d'interaction dynamique entre les parties de ces phénomènes. Il souligne que le besoin d'une telle science de la totalité est apparu dans toutes les disciplines, quel qu'en soit l'objet d'étude, êtres inanimés, organismes vivants ou phénomènes sociaux.

3.1.7.1 Systèmes fermés et systèmes ouverts, équilibre et stabilité

Au cœur de cette science, il pose le concept de « système », comme un ensemble de parties aux propriétés émergentes, et dont le tout est différent de la somme des parties. Puis s'attache à caractériser les différences fondamentales entre « systèmes fermés » et « systèmes ouverts ».

Cette différence, qui va nous concerner tout particulièrement, aura vocation à former pour Von Bertalanffy comme une métaphore de l'articulation positive qu'il cherche à établir entre la physique classique et cette nouvelle science du vivant qu'il tente de définir.

Car cette nouvelle science ne doit plus se constituer en fracture avec la physique classique. Quand avec Schrödinger la physique « quantique » formait comme une exception de la physique classique et de son analyse statistique des systèmes « mécaniques », la théorie générale des systèmes doit savoir, à la fois :

- Incorporer la physique classique quand elle ne traite que des systèmes « **fermés** », considérés comme « **isolés** » de leur environnement, et dont ... ?²²,
- Et en même temps s'en distinguer, en s'intéressant aux systèmes « **ouverts** », c'est-à-dire en interaction avec leur environnement, dont ils reçoivent énergie et matière.

Systèmes ouverts qui caractérisent tout particulièrement pour Von Bertalanffy les « organismes vivants ».

Ce qui nous dit combien il désirait par sa théorie générale introduire lui aussi (mais sans fracture) une exception à la physique conventionnelle quand celle-ci déclare expressément que ses lois ne s'appliquent qu'aux systèmes fermés mécaniques.

Et en particulier une exception au second principe, qui établit que, dans un « système fermé », une certaine quantité appelée entropie doit croître jusqu'à un maximum, et qu'éventuellement le processus s'arrête en « **état d'équilibre** ». C'est-à-dire que les parties d'un système fermé tendent vers l'état de distribution le plus probable, vu comme un état du désordre le plus complet, c'est-à-dire la plus grande entropie²³.

Ceci quand un « système ouvert » fait état d'un « niveau d'organisation » interne des ses parties, qui ne connaît pas, tant qu'il est en activité, d'équilibre chimique et thermodynamique, mais est maintenu dans ce que l'on nomme un « **état stable** », extrêmement improbable au sens thermodynamique, et qui se distingue totalement de l'état d'équilibre. A l'état stable, la composition du système ne varie pas, bien que ses composants changent continuellement, du fait de l'échange d'énergie et de matière entre le système et son environnement.

Ainsi la théorie générale des systèmes rejoint la physique quantique quand celle-ci établit une différence fondamentale d'arrangement atomique entre les molécules des solides inertes périodiques et celles des solides vivants apériodiques. Pour l'une et l'autre discipline, il existe

²² Les termes utilisés ici par Von Bertalanffy (1973, p. 37) amènent une confusion entre systèmes « isolés » et « fermés », ou encore « clos » (selon Georgescu Roegen), qui ne nous permettent pas de préciser ce qu'ils reçoivent ou non de leur environnement. La clarification de ce problème nous sera apportée plus loin par Prigogine.

²³ Cette définition courante de l'entropie maximale nous posera un gros problème quand, étudiant la Terre originelle, il apparaîtra que celle-ci, vue comme « système fermé », est parvenue à un tel état d'équilibre à la fin de son accréation primitive. Car en tendant vers cet équilibre, sa température de surface aurait tendu en même temps vers le zéro absolu, défini par le troisième principe de la thermodynamique comme un niveau d'entropie nulle. Le concept d'entropie peut ainsi connaître des paliers d'expression faisant apparaître des paradoxes très difficiles à interpréter quand on n'observe pas les phénomènes à l'échelle globale et universelle sous tendue par le second principe.

entre l'inerte et le vivant une différence de niveau d'organisation dont la thermodynamique classique ne savait rendre compte.

Mais elle s'en distingue quand par le concept de système, elle établit un pont théorique entre la physique « mécaniste » et la physique théorique du vivant.

Ce que quoi Von Bertalanffy continua à caractériser ces grands contrastes et différences entre systèmes fermés et ouverts.

Citons la notion d'« équifinalité », qui dit que dans un système ouvert, le même état final peut être atteint, à la différence des systèmes fermés, à partir de conditions initiales et/ou de chemins différents.

C'est précisément cette notion qui, selon Von Bertalanffy, a poussé le biologiste allemand Driesch à adhérer au « vitalisme » (Driesch fondera le « néo-vitalisme » (Driesch, 1914)). L'équifinalité selon Driesch contredit les lois de la physique, et ne peut être accomplie que par un facteur vital « animiste », qui gouverne le processus en vue du but à atteindre. Il nommera ce facteur « Entéléchie » (Driesch, 1927).

Toutes choses qui nous montrent combien la polémique prérévolutionnaire introduite dans les années 50 du XVIIIe siècle (notre paragraphe 2.6) était encore parfaitement « vivante » dans les années 50 du XXe siècle !

Et citons comme dernier grand contraste **la contradiction violente entre la dégradation entropique et l'évolution selon Darwin**, entre la loi de dissipation en physique, et celle d'évolution en biologie.

Selon le second principe, la tendance générale des évènements dans la nature physique est d'aller vers des états de désordre maximum et de nivellement des différences, avec comme vision finale « la mort calorifique » de l'Univers ; toute l'énergie est partie en chaleur régulièrement distribuée et le processus du monde s'arrête. Le monde vivant au contraire, et les systèmes ouverts avec lui, montre au cours de son développement embryonnaire et de son évolution un passage vers un ordre plus élevé, une plus grande hétérogénéité et plus d'organisation.

Avec Von Bertalanffy et sa séparation radicale entre systèmes fermés et ouverts, la question vitaliste a ainsi passablement évolué, et nous serions très proches de notre principe d'exception.

Citons le directement (Von Bertalanffy, 1973, p. 163) : « *La thermodynamique classique ne s'occupe, par définition, que de systèmes fermés qui n'échangent pas de matière avec l'extérieur. Pour pouvoir s'occuper de systèmes ouverts, il a fallu une extension et une généralisation connue sous le nom de **thermodynamique irréversible**. Une des conséquences en est la **solution d'un vieux puzzle vitaliste**. Selon le second principe de la thermodynamique, les évènements physiques se dirigent en général vers des états d'entropie et de probabilité maximum, de désordre moléculaire, les différenciations existantes étant nivelées. Au contraire, et en étant en « contradiction violente » avec le second principe, les organismes vivants se maintiennent dans un état fantastiquement improbables, conservant leur ordre en dépit de processus irréversibles continus et même se dirigent, dans le cas du développement embryonnaire et de l'évolution, vers une différenciation plus poussée. Cette énigme apparente disparaît si on considère que le second principe ne s'applique par définition qu'aux systèmes fermés. Alors, dans les systèmes ouverts alimentés en matière riche en énergie, le maintien d'un haut degré d'organisation et même le progrès vers un ordre plus poussé sont possibles thermodynamiquement.* ».

Tiendrions-nous notre exception ?

3.1.7.2 Systèmes ouverts et viols présumés de la loi physique

Poursuivons nos citations (Von Bertalanffy, 1973, p. 39) : « *Mais, 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.** Cependant, dans les systèmes ouverts, il n'y a pas seulement production d'entropie par des processus irréversibles mais*

aussi une importation d'entropie qui peut très bien être négative. C'est le cas de l'organisme vivant qui reçoit des molécules complexes chargées d'énergie libre. Ainsi les systèmes vivants maintenus en état stable peuvent-ils éviter l'accroissement d'entropie ; ils peuvent même évoluer vers des états d'ordre et d'organisation accrus. ».

Von Bertalanffy confirmera plus loin cette position (p. 162) : « *On voit que beaucoup des **viols présumés de la loi physique par la nature vivante** n'existent pas ou plutôt, qu'ils disparaissent avec la généralisation de la théorie physique* ».

Retenons cette formule du viol, car elle réapparaîtra. Ainsi Von Bertalanffy rejoint finalement nos auteurs précédents, en ne contredisant pas le second principe, mais en élargissant son champ avec une nouvelle généralisation du principe de Carnot, la « thermodynamique irréversible généralisée ».

Tout se passe ainsi comme si la question du « vivant », de loin la plus importante de notre modernité, était enfermée dans un immense dilemme que l'on pourrait formuler ainsi : Comment répondre aux vitalistes (et à la question de Bonsack : quelle origine de la création ?) sans sortir pour autant des bornes « inviolables » du second principe ? Et nous pourrions constater que la thermodynamique irréversible, qui apparaît dans les citations tirées de notre auteur comme une généralisation du principe du « non mais » dégagé tant chez Schrödinger que chez Brillouin, s'inscrit parfaitement dans ce dilemme.

Vérifions-le avec cette autre citation (Von Bertalanffy, 1973, p. 156) : « *Comme on le sait, l'information est définie par un terme identique sur le plan formel à l'entropie négative, ce qui met en évidence une correspondance entre les deux systèmes théoriques différents que sont la thermodynamique et la théorie de l'information. Il semble que la prochaine étape soit l'élaboration d'un dictionnaire permettant de passer du langage thermodynamique à celui de la théorie de l'information et vice versa. Il est évident que dans ce but, il faudra employer la thermodynamique irréversible généralisée car **il n'y a que dans les systèmes ouverts que la survie et l'élaboration d'un ordre ne contrarient pas le principe fondamental de l'entropie.*** ».

Le second principe apparaît donc à ce point fondamental (Schrödinger disait aussi de lui : « *la loi de l'accroissement d'entropie, la plus importante, la plus générale de toutes* » (Schrödinger, 1944, p. 140)), qu'il constitue à lui seul la « norme du droit » et de l'autorité dans les sciences physiques. Et cette dernière citation est très significative parce que, tout en caractérisant les questions parmi les plus essentielles de la science moderne, elle fait apparaître que, chaque fois que nous cherchons son exception, nous retombons sous la domination d'un second principe « encore plus définitif ».

Le problème, c'est quand il semble devenir à ce point puissant qu'il puisse « orienter » la recherche. Que la problématique devienne par exemple : quelle est la manifestation du vivant qui ne contredit pas le second principe ? Une forme de détournement que l'on pourrait retrouver chez Ilya Prigogine, qui a généralisé cette thermodynamique irréversible citée par Von Bertalanffy.

Il en restera pourtant que chaque nouvelle réponse apportée par nos contributeurs comprendra son nouveau lot de questions sans réponse face à ce fameux principe « animateur » du vitalisme.

Tout comme il en est des questions qui suivent cette dernière citation de Von Bertalanffy (p. 157) : « *On explique ... l'origine de la vie par l'apparition aléatoire de composés organiques (acides aminés, acides nucléiques, ATP, etc.) dans l'océan primitif ; par la sélection ils ont formé des unités pouvant se reproduire, des virus, des proto-organismes, des cellules, etc. (...) Mais 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.* »

Tout comme pour le marcheur assoiffé dans le désert, le mirage de la réponse « vitale » s'éloigne d'autant plus qu'on s'en approche, en même temps que le soleil de Carnot nous écrase toujours plus de ses rayons impitoyables²⁴.

3.1.8 Synthèse à ce stade : Le principe SBVB

A ce stade, nous avons pu constater que, sauf à se référer tantôt aux êtres vivants, tantôt à l'information ou tantôt aux systèmes ouverts, les concepts d'entropie positive et négative dégagés par Brillouin et Von Bertalanffy révèlent un même principe général que ceux dégagés par Schrödinger en 1944.

Là où nous attendions chaque fois une exception, nous trouvions au contraire une généralisation progressive du principe de Carnot s'étendant plus loin encore vers des domaines de plus en plus variés.

Il nous a donc semblé important d'« isoler » le principe commun qui se dégage de nos auteurs, quelle que soit leur discipline, qui constitue comme un « moment » d'exception au second principe, tout en finissant par s'y rattacher.

Nous le nommerons, pour souligner la part de paternité de chacun : le principe SBVB (pour Schrödinger-Brillouin-Von Bertalanffy).

Censé prendre en compte la question du vivant (et/ou de la création) dans le champ de la thermodynamique, nous pourrions le définir (approximativement, pour les « seuls » besoins de notre démonstration) comme tel : « **Un système ouvert construit et entretient sa structure en puisant l'entropie négative du milieu extérieur, aux dépens d'un rejet d'entropie positive dans ce milieu et d'un accroissement général de l'entropie conforme au second principe** ».

3.1.9 Ilya Prigogine (1917-2003) et la théorie des structures dissipatives

Ilya Prigogine va apporter une pierre considérable à la « thermodynamique des processus irréversibles » avec sa « théorie des structures dissipatives », qui lui vaudra le prix Nobel de chimie.

Ne cherchons plus notre exception chez Prigogine, nous savons maintenant que nous ne la trouverons pas. Mais peut-être portera-t-il notre principe SBVB encore plus loin que les autres. Car avec son concept faisant des systèmes ouverts des structures dissipatives d'énergie libre, l'entropie va devenir un « principe constructeur », non plus contradictoire au, mais producteur de vivant.

Il est difficile de caractériser en quelques mots simples ce en quoi la « thermodynamique non linéaire » selon Prigogine a fait évoluer le concept de « système ouvert » de Von Bertalanffy vers une plus grande prise en compte du vivant « à l'intérieur des lois de la thermodynamique ». Il faudrait pour cela citer de très longs extraits d'un de ses ouvrages fondamentaux, comme par exemple son article concernant *La thermodynamique non linéaire* dans la *Nouvelle alliance* (Prigogine et Stengers, 1979, pp 212-218).

Nous ferons cependant notre possible pour en dégager une synthèse relativement cohérente et compréhensible dans les paragraphes suivants.

²⁴ Nous voudrions pourtant citer le cas parfaitement véridique d'un couple d'amis ayant traversé « à pied » le désert du Néguev. Mourant de soif, proche de l'agonie mais croyant encore aux « miracles », ils virent au loin le mirage d'une orange perdue dans l'immensité. S'approchant à grand peine de celle-ci, elle était bien vraie. Puis ils en virent d'autres, puis d'autres encore, jusqu'à tomber sur la complète cargaison d'oranges d'un camion accidenté, abandonné en plein désert.

3.1.9.1 Systèmes isolés, systèmes fermés, systèmes ouverts

Prigogine nous précise toutes ces notions dans un ouvrage extrêmement rigoureux de par sa progressivité, sa cohérence, son niveau de synthèse et de formulation mathématique : *Introduction à la thermodynamique des processus irréversibles* (Prigogine, 1968).

Prigogine commence par nous donner une définition complémentaire fondamentale du concept de « système » selon Von Bertalanffy.

(Prigogine, 1993, p. 37) : « *Nous ne pouvons parler de « système » que dans les situations de non-équilibre* ».

Puis il décrit les différents types de systèmes dans le chapitre d'ouverture de son *Introduction à la thermodynamique des processus irréversibles*. Il va y préciser des notions sur lesquelles Von Bertalanffy, pourtant leur initiateur, avait introduit un brin de confusion (pas pour lui-même, mais pour nous bien sûr).

Prigogine (1968, p. 1) : « *Les systèmes auxquels nous appliquerons les méthodes thermodynamiques sont formés par le contenu d'un volume géométriquement bien défini et de dimensions macroscopiques. La frontière d'un tel volume est une surface mathématique qui sépare le système du monde extérieur, ou plus simplement de « l'extérieur* ».

Il est utile de classer les systèmes thermodynamiques d'après les échanges d'énergie (chaleur et travail) et de matière à travers leurs frontières.

*Nous distinguerons entre les **systèmes isolés** qui ne peuvent échanger ni énergie ni matière, les **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.* ».

Nous retiendrons ces définitions, très importantes pour la suite de notre démonstration.

Et nous noterons que quand Nicholas Georgescu-Roegen (que nous étudierons plus loin) se réfèrera à ce qu'il dénomme « **système clos** », en parlant du « vaisseau spatial Terre », il faudra entendre par là un « **système fermé** » qui, au sens des définitions de Prigogine, échange de l'énergie avec l'extérieur (l'espace cosmique) mais pas de matière.

3.1.9.2 Ouverture d'un système isolé, phénomènes irréversibles, structures dissipatives

Et Prigogine nous donne des exemples très explicites de tels systèmes.

Prigogine (1993, p. 29) : « *Prenons un réservoir contenant de la matière, **isolé** du monde. Ce système va atteindre l'équilibre. Si, au microscope, nous observons les molécules, nous verrons un mouvement désordonné incessant : c'est le « chaos moléculaire » (qu'il faut distinguer du chaos « dynamique, nous y reviendrons). Si maintenant **nous ouvrons le système** et que nous permettons à des flux d'énergie et de matière de pénétrer dans le système, la situation change radicalement. D'un côté, à l'échelle macroscopique, nous avons des phénomènes irréversibles, flux de chaleur, réactions chimiques, qui conduisent à de nouvelles structures spatio-temporelles impossibles à réaliser à l'équilibre. D'un autre côté, le chaos moléculaire s'organise et donne lieu à des brisements de symétrie temporelle, à des brisements de symétrie d'espace.* »

Retenons cette notion de « dissymétrie » des structures dissipatives, car Pasteur, puis Pierre Curie, l'avaient observée, et Vernadsky, que nous allons étudier, avaient fortement attiré l'attention sur cette « caractéristique » du vivant, qui « distord » les concepts de symétrie du temps et de l'espace de la physique classique newtonienne.

Et notons simplement que Prigogine nous met dans la confusion quand il parle du réservoir comme système, car il nous a dit que l'on ne peut parler de système que dans les situations de non-équilibre, alors que ce réservoir va atteindre selon lui l'équilibre. Ce qui pourrait vouloir dire que tant que l'état du réservoir évoluait, il était un système, et que quand il a atteint l'équilibre, il n'en était plus un. Ceci dit, la chose qui est ici intéressante à souligner, c'est qu'un système ne commence vraiment à exister que quand l'enceinte quelconque qui va le circonscire s'ouvre aux échanges extérieurs. Un système est donc par définition une notion très dynamique (et ce réservoir serait donc tout simplement un système « statique »).

3.1.9.3 Dégradation entropique et « quatrième loi » de la thermodynamique

Nous disions que Prigogine et Georgescu-Roegen eurent des relations difficiles. Outre ce que nous en dit Jacques Grinevald (2006), on peut supposer qu'ils eurent quelques conflits de paternité dus notamment à une « quatrième loi de la thermodynamique », concernant la dégradation entropique de la matière, dont Georgescu Roegen (1979, pp. 125-127) s'enorgueillit d'être le père. On trouve en effet une référence explicite à ce sujet dans ce même ouvrage de Prigogine (1968, p. 94), sans qu'il fasse pour autant référence à une loi spécifique. Cette extension de l'entropie à la matière semble n'être vu pour lui que comme une simple application du principe de Carnot à la masse et à son principe de conservation dans les systèmes fermés et ouverts (Prigogine, 1968, pp. 2-6). Ce principe de conservation de la masse étant vu lui-même comme un élargissement à la masse du premier principe de conservation de l'énergie (Einstein n'a-t-il pas démontré avant Prigogine et Georgescu-Roegen la relation universelle entre énergie et masse !).

Citation (Prigogine, 1968, p. 94) : « *L'inégalité (...) pour l'état stationnaire conduit à la conclusion que l'entropie de la matière entrant dans le système doit être plus petite que celle cédée par le système au monde extérieur. D'un point de vue thermodynamique le système ouvert « dégrade » la matière qu'il reçoit et c'est cette dégradation qui maintient l'état stationnaire.* »

3.1.9.4 Thermodynamique non linéaire et structures dissipatives

Nous n'avons ni l'ambition, ni les compétences, ni l'objectif de reprendre ici les formulations mathématiques complexes de la théorie des structures dissipatives selon Prigogine. Nous tenterons seulement de faire une toute petite synthèse (dont on voudra bien excuser la maladresse et la difficile compréhension) de ce qu'il entend par là :

Au-delà des systèmes (fermés et ouverts) de non équilibre à l'état stationnaire (ou stable), qui tendent à une production minimale d'entropie, la thermodynamique des processus irréversibles non linéaires, qui s'intéresse aux « structures dissipatives », mesure ce que les équations probabilistes d'entropie de Boltzmann ne peuvent plus mesurer, et décrit ce que la physique quantique ne peut plus décrire. Les structures dissipatives sont des formes de « changements de phase », souvent accidentels, de certains états stationnaires de la matière (une « fluctuation géante » de ces états), qu'elles rendent ainsi instables. De bons exemples seront représentés par les tourbillons dans les régimes d'écoulement turbulents des canalisations d'eau, bien connus en dynamique des fluides, ou par de l'eau qui bout dans une casserole. Ces structures dissipatives peuvent amener vers un « nouvel ordre moléculaire », qui se stabilisera en ce nouvel état (devenant ainsi une « instabilité stabilisée », comme l'instabilité dite de Bénard), grâce à un échange constant d'énergie et de matière avec le milieu extérieur, et donc en produisant un flux continu d'entropie. C'est ce que l'on pourra nommer un « processus local d'auto-organisation ».

C'est ainsi que (Prigogine et Stengers, 1979, p 215-216) : « *Dans ce contexte, un phénomène tel que l'apparition de formes vivantes pourrait être considéré comme prévisible du point de vue de la théorie physique. La vie échapperait certes au principe d'ordre de Boltzmann, mais elle entrerait dans l'ordre des possibilités impliquées par la thermodynamique loin de l'équilibre. Les cellules de Bénard constituent un premier type de structure dissipative, dont le nom traduit **l'association entre l'idée d'ordre et l'idée de gaspillage** et fut choisi à dessein pour exprimer **un fait fondamentalement nouveau : la dissipation d'énergie et de matière - généralement associée aux idées de perte de rendement et d'évolution vers le désordre - devient, loin de l'équilibre, source d'ordre** ; la dissipation est à l'origine de ce qu'on peut bien appeler de nouveaux états de la matière. Les structures dissipatives constituent en effet une forme d'organisation supermoléculaire ... qui reflètent intrinsèquement la situation globale de non équilibre qui leur a donné naissance.* »

Ainsi Prigogine aurait-il tenté de résoudre, ne serait-ce qu'en partie, les dernières questions de Von Bertalanffy : « *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.* ». Sa théorie des structures dissipatives pourrait apparaître, à priori, comme une première réponse à notre énigme vitaliste. Et elle constitue, certes, une « révolution de la pensée physique ».

Sauf que là où nous cherchions une nature productrice d'ordre grâce à sa fonction « nég » entropique, Prigogine nous démontre exactement le contraire en inversant notre proposition. C'est la fonction « entropique » qui apparaît ici comme productrice de cet ordre recherchée.

Ce en quoi il illustre, mais pour les systèmes « physiques », le principe de Schrödinger de production de « l'ordre par l'ordre », c'est à dire notre principe SBVB, selon lequel les systèmes ouverts entretiennent leur structure en se nourrissant d'entropie négative, aux dépens d'un rejet d'entropie positive dans le milieu.

Ce qui représente une confirmation par la physique fondamentale de ce que nous savions déjà.

Alors que Prigogine l'annonce comme une découverte fondamentale, à savoir que (Prigogine et Stengers, 1979, pp. 288-289) : «... l'activité irréversible (des structures dissipatives - on aura compris qu'elles étaient productrices d'entropie par définition) devient constructive, le système acquiert une autonomie La prétention de la dynamique, de réduire la spécificité de la thermodynamique à l'effet d'une connaissance approximative, devient démesurée dès le moment où le rôle constructif de l'entropie se révèle ... La découverte du rôle constructif de l'entropie, a imposé à l'intérieur des sciences de la nature ... une question depuis longtemps posée par ceux pour qui, comprendre la nature, c'était la comprendre capable de produire les hommes et leurs sociétés. »

Il entend par là cette vieille critique des principes « mécanistes » de la thermodynamique par les sciences émergentes du vivant, dans la seconde moitié du XIXe siècle. Critique à laquelle se seraient ralliés autant Marx et Engels (ce dernier estimant dans sa *Dialectique de la Nature* que le mécanisme est mort, et que rien ne s'oppose plus désormais à la recherche, dans l'histoire de la nature et des sociétés humaines, des lois générales du développement historique : les lois dialectiques). Ceci alors que pour Prigogine (Prigogine et Stengers, 1979, p 290) : « ... l'ensemble des interprétations subjectivistes de l'entropie, et la négation de la singularité des processus irréversibles qu'elles impliquent, constituent au contraire une sorte de confirmation de l'accusation bien connue selon laquelle le mécanisme implique un idéalisme plus ou moins avoué ».

Tout comme cette singularité très particulière des structures dissipatives, par laquelle elles inversent la théorie universelle selon laquelle l'entropie est synonyme de désordre, Prigogine introduit donc en même temps qu'elles une autre inversion fondamentale. Celle des conceptions issues du XIXe siècle qui faisaient suite aux débats initiaux de la Physiocratie (on sait que Marx et Engels apprécieraient beaucoup la Physiocratie, même si elle n'apportait pas toutes leurs réponses recherchées) : ce sont les mécanistes qui se révèlent finalement les véritables idéalistes, quand les idéaux des scientifiques de la nature et autres vitalistes ont montré toutes leurs limites et contradictions insolubles.

3.1.9.5 La mesure de l'entropie : une nouvelle science ?

Prigogine aura dans le siècle apporté au concept de Carnot, suite aux chercheurs précédents, une nouvelle dimension fondamentale. Face à la question gênante des vitalistes, il aura élargi et « généralisé » à ce point le second principe qu'il va élever « la question de l'entropie » au statut d'une « question pivot de la science moderne » dans sa tentative d'explication de la complexité du monde vivant.

En ferait-il la science qui rendra compte du vivant ?

Comme il le dit lui même (Prigogine, 1968, p. 17) : « Le seul critère général d'irréversibilité est donné par la production d'entropie », ou encore (Prigogine, 1968, p.100) : « La thermodynamique des processus irréversibles se ramène presque uniquement à l'analyse de la production d'entropie et l'étude des relations entre vitesse et affinités », ou enfin (Prigogine, 1968, p. 146) : « Il est clair que les structures biologiques ne peuvent trouver leur origine que dans un milieu dissipatif et subsister que par un apport continu d'énergie ».

Ce qui en d'autres mots signifie : si vous voulez identifier un système ou une structure vraiment « vivante », observez sa dépense d'entropie, car plus elle sera importante, plus elle indiquera un caractère d'irréversibilité significatif du vivant !

Et il va finalement nous donner l'exemple le plus parlant qu'il soit possible de donner d'une structure dissipative proche du vivant, à l'apogée de ses représentations systémiques.

3.1.9.6 Définition fondamentale de la ville : c'est une structure dissipative !

Cette « généralisation empirique » (nous aurons l'occasion d'expliquer ce concept, tiré de Vernadsky) des structures dissipatives à l'échelle de la ville représente selon nous, en parallèle à Georgescu-Roegen, le plus grand apport de Prigogine quant aux sciences économiques et sociales de notre modernité. Nous nous devons de la souligner.

Prigogine (1993, p. 28) : *« L'exemple le plus simple de structure dissipative que l'on peut évoquer par analogie, c'est la ville. Une ville est différente de la campagne qui l'entoure. Les racines de cette individuation résident dans les relations qu'elle entretient avec la campagne avoisinante. Si on supprimait ces relations, la ville disparaîtrait. »*

Cette phrase de Prigogine, sortie naturellement dans le cours de son écrit, s'avère très remarquable. Elle **résume** d'une part toute l'histoire de la pensée économique et de la croissance, qui fondent le développement urbain de l'humanité actuelle, elle résume d'autre part toute l'histoire de la critique marxiste puis écologique de cette même croissance, quant aux origines de la formation du capital notamment. Elle nous indique que la ville tire essentiellement sa néguentropie de la nature.

Nous aurions donc pu croire que suite à cette phrase, Prigogine en viendrait à formuler une exception « naturelle » du second principe représentée par la campagne.

Mais non, il avait dit plus haut (ce qui formait alors la conclusion de son ouvrage de 1968) que *« les structures biologiques ne peuvent trouver leur origine que dans un milieu dissipatif et subsister que par un apport continu d'énergie »*. Ce en quoi la campagne, toute différente de la ville qu'elle soit, serait donc tout aussi dissipative que cette dernière !

Et nous découvrons au contraire avec Prigogine que les flux entropiques incessants de notre urbanité, ses tourbillons accidentels en développement croissant, ses instabilités de plus en plus stables, qui forment tout autant de structures dissipatives, ne sont finalement que le signe encourageant de l'organisation croissante, et quelque part de la « production de vivant », de notre humanité moderne.

Ce qui nous explique d'autant la rivalité qu'il entretiendra avec Georgescu Roegen (Grinevald, 2006), quand on apprend que ce dernier, partant des mêmes constats généraux sur l'économie urbaine, aboutira à des conclusions, disons « politiques », radicalement différentes, à l'exemple du concept de « décroissance » dont il sera le père (voir plus loin).

3.1.9.7 Retour aux positions paradoxales de la science

Nous avons cru un moment avoir attrapé avec Prigogine notre exception par le collet, mais que nenni, il nous renvoie une fois de plus à l'éternelle énigme de Bonsack concernant la création originelle du stock d'entropie négative. Il se retranche sans rien en dire, sauf à le poser, à l'exemple de Von Bertalanffy, comme un problème irrésolu de la science, derrière cette position paradoxale des nouvelles sciences du XIXe siècle, la biologie darwinienne et la thermodynamique, fondées sur des « paradigmes » différents :

Prigogine (1993, p. 20) : *« La biologie depuis Darwin est l'expression d'un paradigme évolutionniste mais le darwinisme insistait sur l'apparition de nouveautés - nouvelles espèces, nouveaux modes d'adaptation, nouvelles niches écologiques - tandis que la vision thermodynamique ne parlait que de nivellement et de mort thermique. L'Univers aurait commencé à un niveau d'entropie très bas correspondant à un « ordre » initial pour aboutir après un temps suffisamment long à la mort thermique. »*

Il n'y a donc chez Prigogine aucune solution à notre index de biodiversité !

3.1.10 Nicholas Georgescu-Roegen (1906-1994) et La Décroissance

Nicholas Georgescu Roegen est considéré par certains comme un des pères fondateurs de l'économie écologique, notamment du fait que, comme économiste, il va s'intéresser plus que d'autres à identifier, via la thermodynamique, les rapports de dépendance étroits existant entre les pressions environnementales et la croissance économique. C'est Cutler J. Cleveland (1999) et Jacques Grinevald (1994, 2006), qui nous ont fait l'historique de la contribution exceptionnelle de ce chercheur dans le contexte historique d'apparition de l'économie écologique, depuis la lointaine physiocratie.

Georgescu Roegen est par ailleurs le père « spirituel » d'un mouvement politico-économique aujourd'hui bien connu sous le nom de « Décroissance », qui forme le titre d'une de ses dernières publications (Georgescu Roegen, 1979).

Il nous apparaissait donc légitime de chercher chez cet auteur, plus près de nous dans le temps et la discipline, en même temps que contradictoire (relatif) de Prigogine, la piste d'une exception « scientifique » au second principe qui viendrait contrebalancer la longue litanie de sa domination croissante tout au long du XXe siècle, au delà des contrefeux finalement bien timides à l'exemple du « Démon de Maxwell ».

Et effectivement Georgescu Roegen s'est intéressé lui aussi au vivant. Et comme bien d'autres avec lui, il fut très impressionné après guerre par le petit livre de Schrödinger : *Qu'est-ce que la vie ?*

Partant du constat « quantique » de l'exception du vivant, il va chercher à élargir, en se servant des apports de Von Bertalanffy, et de Prigogine (qu'il cite souvent, avec réserve), le concept de « système ouvert », et donc le principe SBVB, à l'économie toute entière.

Comparons ce que dit notre auteur de l'économie avec ce qu'ont dit Schrödinger et Prigogine à propos des organismes vivants (paragraphe 3.1.):

Georgescu-Roegen, 1979, p 42) : « ... considérons le processus économique comme un tout et d'un point de vue strictement physique. Ce que nous devons relever tout d'abord, c'est que ce processus est un processus partiel qui, à l'instar de tout processus partiel, est circonscrit par une frontière au travers de laquelle de la matière et de l'énergie sont échangées avec le reste de l'univers matériel. La réponse à la question sur ce que fait ce processus matériel 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 ... Nous pouvons espérer que même les partisans les plus acharnés de la thèse selon laquelle les ressources naturelles n'ont rien à voir avec la valeur finiront par admettre qu'il y a une différence entre ce qui est absorbé dans le processus économique et ce qui en sort. Et cette différence, bien sûr, ne peut être que qualitative... 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. »

Au sortir de ces considérations préliminaires, on se prendrait à espérer enfin une surprise du genre : « ... et cette différence qualitative entre matière-énergie entrant et sortant de l'économie, comment et où pensez-vous qu'elle est fabriquée, si ce n'est par et dans l'environnement ! ».

Georgescu-Roegen formulera t-il de nouvelles hypothèses « isolant » une singularité particulière du « monde vivant » (l'environnement au sens large) face au mode comportemental de l'économie humaine vue comme un système ouvert ? En sortira t-il les pistes d'un modèle alternatif au « processus économique », susceptible d'une quelconque manière de nous permettre de « remonter la pente de l'entropie » ?

Et bien non, encore une fois non, et définitivement non !

Convaincu par Schrödinger, à la fois des capacités du vivant à se différencier de la matière « inerte », mais aussi des implications philosophiques fondamentales du concept d'entropie, il va finir par se rendre complètement au second principe à l'exemple de ses prédécesseurs.

Elargissant le principe de Carnot à la matière là où il ne prenait en compte que l'énergie (sa quatrième loi de la thermodynamique), puis élargissant le principe SBVB à la sphère économique toute entière, il en profitera pour étendre du même geste le principe SBVB à la sphère qui se situe « en face » de la sphère économique, la biosphère (ou disons plutôt l'environnement strictement « naturel », les écosystèmes « naturels », vu le sens ambigu que peut revêtir pour certains le concept de biosphère, et vu que de toutes façons Georgescu-Roegen ne cite pas la biosphère).

Il appliquera finalement le second principe à « la planète Terre toute entière », celle-ci étant considérée comme un système « clos » (nous avons vu qu'il faut entendre par là un système « fermé ») qui échange de l'énergie avec l'extérieur, mais pas de matière.

Mais nous réservons à un autre chapitre de plus larges extraits de Georgescu-Roegen, à partir desquels nous examinerons plus en détail ce concept de « planète Terre vue comme un système clos ». Revenons pour le moment à notre problématique et à la réponse spécifique de Georgescu-Roegen :

Georgescu-Roegen (1979, p 45-46) : « *Certains auteurs, impressionnés par le fait que les organismes vivants restent presque inchangés pendant de courtes périodes de temps, ont avancé l'idée que la vie échappe à la Loi de l'Entropie. Certes, il se pourrait que la vie eût des propriétés irréductibles aux lois physiques ; mais l'idée même qu'elle pourrait violer les lois régissant la matière - ce qui est tout différent - relève de l'absurdité pure. 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 toute autre structure matérielle. Mais l'entropie du système total, constitué par l'organisme et son environnement ne peut que croître. En réalité, l'entropie d'un système croît plus vite s'il y a de la vie que s'il n'y en a pas. Le fait que tout organisme vivant combat la dégradation entropique de sa propre structure matérielle peut bien constituer une propriété caractéristique de la vie, irréductible aux lois du monde matériel ; il n'en constitue pas pour autant une violation de ces lois.* »

Et il dira plus loin (Georgescu-Roegen, 1979, p 64) : « *... l'idée que la vie puisse violer une loi naturelle n'a pas de place dans la science* ». Souvenons-nous de la formule de Von Bertalanffy (1973, p 162) : « *On voit que beaucoup des **viols présumés de la loi physique par la nature vivante** n'existent pas ou plutôt, qu'ils disparaissent avec la généralisation de la théorie physique* ».

Nous touchons ici un point très dur de la résistance à notre exception.

Ceci dit, cette position pour le moins catégorique n'aura pas empêché Georgescu-Roegen d'exprimer quelques réserves. Il s'intéresse dans les pages 64-65 au fait que l'entropie est un concept indéterminé n'a pas vraiment de dimension « quantitative » : « *Tout aussi important est le fait que la Loi de l'Entropie est la seule loi naturelle dont la prédiction n'est pas quantitative. Elle ne spécifie pas de combien sera l'accroissement à tel moment à venir ou quelle configuration entropique particulière surviendra.* ».

Ce qui lui permettra d'ajouter son bémol prudent.

Georgescu-Roegen (1979, p 65) : « *C'est aussi en raison de l'indétermination entropique que **la vie n'est pas sans importance** pour le processus entropique. **Il ne s'agit pas là de vitalisme mystique**, mais d'une affaire de faits bruts. Certains organismes ralentissent la dégradation entropique. **Les plantes vertes emmagasinent une partie du rayonnement solaire qui autrement serait immédiatement dissipée en chaleur**, en haute entropie.* ».

Le débat est donc clos ! Et l'on constate bien au final chez Georgescu-Roegen, quels que soient ses apports fondamentaux, cet anti-vitalisme vivace des partisans du totalitarisme entropique.

Au point de pouvoir caractériser un lieu de fracture fondamental de la science dont nous avons pu identifier la persistance depuis au moins deux cents ans. Non pas tellement entre la physique et la biologie, comme on caractérise le plus souvent ce grand clivage, mais plus fondamentalement entre la thermodynamique et le vitalisme (pour peu que l'on admette que Paul-Joseph Barthez et Marie François Xavier Bichat, ses fondateurs, aient eu une réelle démarche scientifique).

Ce ne fut pas du tout notre objet de caractériser ici (à grands traits) un tel clivage, mais force est de reconnaître qu'il est apparu comme une constante tout au long du déroulé de notre problématique. Et il nous appartient donc quelque part de pouvoir le « dépasser » (ce qui suppose de ne pas s'y embourber en cherchant à le résoudre, comme d'autres avant nous, de beaucoup mieux armés), au risque de faire tout simplement « avorter » notre thèse.

Et pour cela d'aborder le point de vue du « vitalisme » quant à cette question du vivant.

Mais nous finirons d'abord ce chapitre en regardant ce que disent les représentants actuels de l'« économie écologique » à la suite des problématiques soulevées tout au long de ce point de vue « thermodynamique ».

3.1.11 ... et quand l'économie écologique propose une « science » de la soutenabilité

En forme d'une synthèse des recherches précédentes ensemble ramenées « aujourd'hui » à la question « écologique » de la « soutenabilité » économique, Martin O'Connor va recourir aux concepts dérivés de la thermodynamique loin de l'équilibre et de la théorie des systèmes ouverts pour proposer une épistémologie (une science) pour la soutenabilité (O'Connor, 1994).

On peut pour lui comprendre la crise de l'environnement comme l'échec d'un réel contrôle sur la nature, vu comme principe de base de l'accumulation capitaliste depuis qu'un Ricardo s'est autorisé à penser la nature comme « illimitée ». En substance, l'environnement se présente comme l'obstacle, la limite, et donc l'antithèse de la raison instrumentale de l'homme.

Là où avec Ricardo l'économiste a pensé que les pouvoirs indestructibles de la terre supposaient que ses ressources n'aient aucun prix, c'est aujourd'hui la science qui nous informe de la finitude de notre « capital » écologique, ... ceci quand elle était supposée dans le passé nous permettre d'améliorer les fondements technologiques d'une maîtrise des processus naturels²⁵.

Il devient donc impératif d'assurer une juste utilisation de ressources environnementales devenues rares. Et dans ce contexte, cette évolution de la position de la science nous propose une alternative dans laquelle elle nous fournirait une aide en matière de juste répartition environnementale (dans le cadre des conflits économie - environnement). Nous aurions ainsi besoin d'une « épistémologie » adaptée aux exigences du processus social de résolution des conflits économie-environnement.

Nous devons changer notre vision de la science, ceci notamment afin de pouvoir mettre en évidence, d'une part, la « coévolution » entre les conditions sociales et matérielles de la vie et les conceptions dominantes du système de production qu'elles supposent, d'autre part la « coévolution » de la nature naturelle et de la nature humaine dans leurs besoins réciproques.

Et pour cela, c'est à dire pour éclairer les faiblesses et les aveuglements de la conception « industrielle » de la production, nous appuyer sur des éléments issus de l'analyse des systèmes ouverts et sur la théorie thermodynamique (science de la production par excellence) des processus irréversibles.

Ce qui supposerait (nous reprenons la parole) que l'évolution constatée entre la thermodynamique (linéaire) des systèmes fermés et la thermodynamique (non linéaire) des systèmes ouverts irréversibles, nous fournisse un modèle des évolutions à mettre en œuvre au sein de notre « système » de production mécaniste. Système qui, trop longtemps, n'a donné aucun prix à ce qui traversait ses frontières, des ressources naturelles supposées illimitées à l'entrée et des déchets sans fin en sortie. Et donc au minimum que l'on apprenne à mesurer la différence de « niveau entropique » entre l'entrée et la sortie, pour savoir « en quoi » l'emprunt de « néguentropie » à la nature est ou non supportable pour cette dernière, au delà des seuls constats de son « échauffement ». Et que l'on apprenne ensuite si possible « comment » compenser cet emprunt.

²⁵ Curieux de constater ce paradoxe : En ce même moment où les économistes de la noblesse anglo-saxonne pensaient le caractère illimité de la nature, les révolutionnaires et machinistes français (Carnot père et fils), pensaient au contraire les concepts des limites « mécaniques » à son expansion. Et c'est ensemble pourtant qu'ils pensèrent cette nouvelle révolution « industrielle » d'une économie vue comme une machine !

Une telle vision de la science serait l'antithèse du réductionnisme et constitue le point de départ pour une science « de l'économie et de l'écologie » fondée sur les systèmes ouverts. Revisiter ainsi la crise écologique dans la perspective offerte par la thermodynamique des systèmes ouverts, fondée sur les concepts d'énergie et de matière dissipée ou conservée, dans une nouvelle perspective qui voit dorénavant la terre comme un système matériellement « fermé » qui ne saurait supporter le type de croissance de la production économique.

Il s'agit désormais de conceptualiser et d'envisager la codépendance des activités de production naturelles et économiques au sein d'une nouvelle « épistémè de la production écologique ».

3.2 Le point de vue « vitaliste »

3.2.1 Derrière le mur, mais juste de l'autre côté

Nous ne chercherons point ici à faire une revue de la question du vivant telle qu'entrevue par le Vitalisme. Ce serait ouvrir une boîte de Pandore dans laquelle nous passerions le reste de notre vie. Comme nous le disions, notre problème n'est d'entrer dans un débat mais de trouver des solutions « concrètes » à des problèmes « vitaux » qui regardent au cœur des relations de plus en plus difficiles entre économie et environnement.

La question n'est donc pas de prendre un parti quelconque dans cette polémique, ou plutôt cette « controverse » (Sheldrake, 1991, p.137), qui dure au minimum depuis deux siècles. Mais plus humblement de s'autoriser à dépasser un moment les clivages, pour tenter d'identifier des alternatives de solution possibles face à un point de vue thermodynamique qui, quoiqu'il ait fait passablement évoluer notre problématique, nous a interdit la sortie recherchée.

Mais comme le dit Sheldrake (1991, p.137) : « *Les théoriciens systémiques, de crainte d'être qualifiés de vitalistes, se sont gardés de suggérer l'existence de nouveaux types d'entités causales dans la nature - des âmes ou des champs inconnus de la physique. Les problèmes paraissaient devoir être appréhendés en termes abstraits, tels que transfert d'information et feedback, en évitant de s'interroger sur la base physique de ces processus, lesquels dépendraient implicitement des seuls champs de force connus de la physique.* ».

Ce qui veut bien dire, comme nous l'avons compris au survol des travaux de Von Bertalanffy, Prigogine et Georgescu-Roegen, qu'il y a un mur, qui séparerait crédibilité et hérésie scientifique, que chacun s'interdit absolument de traverser.

C'est donc au plus près de ce mur, mais « juste de l'autre côté », c'est à dire au plus près d'une position scientifique au sens traditionnel du terme, que nous chercherons des contributions évoluant autour du vitalisme qui envisageraient la question du vivant d'un point de vue assez large pour pouvoir repérer les relations qu'elle entretient, dans les parages de la thermodynamique et de la théorie générale des systèmes, avec la base inerte du monde telle que décrite par la physique classique.

Contributions qui bien entendu nous apporteraient des éclairages nouveaux !

Leurs auteurs devront pouvoir être des « scientifiques » qui, quoique se positionnant (ou étant positionnés) comme vitalistes, seront reconnus à l'intérieur de leur champ disciplinaire comme des autorités dont le sérieux (scientifique au moins) ne fait pas « trop de doutes ».

Parmi ceux-ci, on peut distinguer très grossièrement deux catégories :

- Les embryologistes, généticiens ou biologistes qui s'intéressent à l'organisme vivant, ses fonctions internes, son développement, sa croissance, jusqu'aux différences essentielles pouvant caractériser le vivant du mort sur la base d'une même composition physico-chimique de l'organisme. Parmi ceux-ci nous pouvons identifier deux grands noms, Hans Driesch, fondateur du néo-vitalisme (Driesch, 1914, 1927), et Rupert Sheldrake, connu pour sa théorie des « champs morphogénétiques » et ses questionnements sur le vivant et la « Nature » au sens le plus large (Sheldrake, 1981, 1991).

Mais cette catégorie de chercheurs vitalistes soit est trop spécialisée, soit sort du champ de notre problématique. Dans tous les cas à ce stade de son expression.

- Les pédologues, géologues, géochimistes, biophysiciens, agronomes, certains biologistes aussi, qui, au niveau des sciences de la terre, s'intéressent aux interrelations diverses entre phénomènes physico-chimiques et êtres vivants, qui permettent l'émergence de la qualité et la diversité biologique. C'est dans cette catégorie de chercheurs concrètement impliqués que nous trouvons les fondateurs de l'agriculture biologique, qui ont repris au XXe siècle le flambeau, à la foi théorique et appliqué, de notre abbé Rozier du XVIIIe siècle. Nous citerons parmi ceux-ci Hans Peter Rush, fondateur de la méthode Muller avec sa *Fécondité du sol* (Rush, 1968), et Sir Albert Howard avec son *Testament agricole pour une agriculture naturelle* (Howard, 1940).

Nous trouvons aussi dans cette deuxième catégorie d'autres chercheurs (avec leurs travaux et hypothèses), biophysiciens, biogéochimistes, ou plus encore « géophysiolgistes », qui ont étudié les processus de régulation planétaire et rapproché des domaines de recherche qui sont normalement le fait de disciplines académiques distinctes, telles que la minéralogie, la pédologie, la géologie, l'océanographie, la climatologie, la biologie, la physiologie, ... Ils ont ainsi pu regarder les interactions entre processus physiques et processus biologiques à une telle échelle de l'espace et du temps qu'elle puisse leur permettre de rendre compte de l'histoire évolutive de la terre, regardée à l'échelle la plus large comme une « biogéosphère » (Académie des sciences, 2007, p.1).

Nous nous intéresserons à cette dernière catégorie de chercheurs, la plus proche de notre problématique, et tout d'abord à l'un des plus célèbres d'entre eux, ...pendant la guerre froide !

3.2.2 Lovelock, concepts généraux, première hypothèse

Nous voici avec James Lovelock, et notamment son « hypothèse Gaïa », avec une proposition « vitaliste » radicalement alternative à celle des mécanistes : *La terre est un être vivant* (Lovelock, 1979).

L'histoire de l'hypothèse Gaïa se déroule en deux temps, une première hypothèse concernant la production de l'atmosphère par le vivant, et l'hypothèse Gaïa proprement dite. Laissons Lovelock nous la raconter à travers une suite de citations dont nous mettrons en gras certains passages que nous serons amenés à commenter.

(Lovelock, 1979, pp. 21-32) : « ... la quête de Gaïa n'est autre qu'une tentative de découvrir la plus grande créature vivante sur Terre ... si Gaïa existe bel et bien, il est probable que nous arrivions à la conclusion que nous et tous les êtres vivants faisons partie intégrante d'un vaste organisme qui possède dans son ensemble le pouvoir de conserver à notre planète ses caractéristiques vitales.»

Nous sommes donc bien avec Lovelock dans le « vitalisme » !

Mais poursuivons nos citations : « *La quête de Gaïa commença en réalité il y a plus de quinze ans, lorsque la NASA élaborait pour la première fois des plans pour rechercher des traces de la vie sur Mars ... Je faisais alors partie d'une équipe de conseillers, qui serait par la suite dirigée par Norman Horowitz, l'un des plus prodigieux biologistes spatiaux, et dont l'objectif principal était de mettre au point des moyens de déceler la vie sur Mars et d'autres planètes...A cette époque, l'organisation des expériences se fondait essentiellement sur l'hypothèse que les preuves d'une vie sur Mars seraient assez semblables à celles de la vie sur Terre...J'en arrivai à me poser des questions pragmatiques telles que : « Quelle assurance avons-nous que le mode de vie martien, pour autant qu'il existe, se prêtera aux méthodes de détection valables dans le cas du mode de vie terrestre ? ». Pour ne rien dire d'interrogations encore plus complexes, notamment : « Qu'est-ce que la vie, et comment reconnaître sa présence ? ». Certains de mes collègues ... me demandèrent à brûle-pourpoint : « Eh bien, quelle alternative proposes-tu ? ». Ma réponse demeura des plus vagues à l'époque : « Je rechercherais une réduction d'entropie, car celle-ci doit être une caractéristique générale de toutes les formes de vie. »*

*Il est compréhensible que les uns objectèrent que ma solution était irréaliste et que les autres s'en trouvèrent tout simplement offusqués. Il convient de préciser que rares sont les concepts physiques ayant engendré une confusion et une incompréhension plus grande que celui d'entropie... Ma suggestion avait été rejetée mais **l'idée de rechercher une réduction ou un renversement d'entropie comme signe de vie s'était implantée dans mon esprit**. Elle germa et se développa jusqu'à devenir, grâce à l'aide de plusieurs collègues - ...en particulier Lynn Margulis - l'hypothèse qui fait aujourd'hui l'idée de ce livre.... Je lus beaucoup, espérant découvrir dans la littérature scientifique une définition complète de la vie considérée comme un processus physique, sur laquelle il serait possible de fonder le principe des expériences visant à la détecter. Je fus consterné de voir combien étaient rares les écrits consacrés à la nature de la vie elle-même... Dans la vaste encyclopédie de faits qui se trouvait à notre disposition, le cœur du sujet - la vie elle-même - avait été quasiment ignoré... On a déjà consacré de nombreux écrits à la cybernétique de l'intelligence artificielle mais la question relative à la définition de la vie réelle en termes cybernétiques demeure sans réponse et fait rarement l'objet de discussions.*

Quelques scientifiques se sont efforcés de définir la vie au cours de ce siècle. Bernal, Schrödinger et Wigner en sont tous arrivés à la même conclusion générale, à savoir que **la vie est un membre de la classe des phénomènes qui sont des systèmes ouverts ou continus, capables de réduire leur entropie interne aux dépens de substance ou d'énergie libre qu'ils absorbent de l'environnement et qu'ils rejettent par la suite sous une forme dégradée.** Cette définition est non seulement difficile à comprendre mais encore elle est trop générale pour s'appliquer à une détection spécifique de la vie. Une paraphrase grossière mais acceptable voudrait que la vie soit l'un de ces processus que l'on découvre à chaque fois qu'il y a un flux d'énergie abondant. Elle se caractérise par une tendance à se former en consommant, mais pour ce faire, elle doit également excréter des produits inférieurs dans l'environnement. **Nous constatons que cette définition s'appliquerait avec le même bonheur aux tourbillons se formant dans un cours d'eau, aux ouragans, aux flammes ou encore aux réfrigérateurs et à d'autres inventions de l'homme...**

Cependant même si cette classification est trop vaste et trop vague, elle nous indique la bonne voie. **Elle suggère par exemple l'existence d'une limite, ou interface, entre la région « usine » où le flux d'énergie - ou les matières brutes - est employé et où l'entropie est en conséquence réduite, et l'environnement qui reçoit les déchets rejetés.** Elle suggère également que des processus ayant l'apparence de la vie nécessitent un flux d'énergie supérieur à une valeur minimale afin de pouvoir se maintenir en état d'activité... Elle (la vie) requiert un certain apport énergétique pour rompre les liens chimiques ; la simple chaleur n'est pas suffisante.

La conception d'une expérience universelle de détection de vie se fondant sur une réduction d'entropie paraissait à l'époque un exercice vain. Pourtant, en supposant que la vie sur toute planète soit contrainte d'utiliser les médias fluides - océans, atmosphère, voire les deux - pour véhiculer les matières brutes et les déchets, il m'est apparu qu'une partie de l'activité associée à une réduction d'entropie concentrée au sein d'un système vivant serait susceptible de se déverser en de telles régions et d'en altérer la composition. Il serait par conséquent possible de différencier l'atmosphère d'une planète porteuse de vie et celle d'une planète morte...

J'en étais là de mes réflexions lorsque Dian Hitchcock visita les laboratoires jet Propulsion... La notion de détection de vie par analyse atmosphérique la séduisit et nous entreprîmes de la développer ensemble. Utilisant notre propre planète comme modèle, nous avons examiné dans quelle mesure une connaissance simple de la composition chimique de l'atmosphère terrestre, s'ajoutant à une information aussi aisément accessible telle que le degré de radiation solaire, la présence des océans et de masses de terre à la surface de notre planète, nous permettrait de prouver l'existence de la vie.

Nos résultats nous convainquirent du fait que la seule explication que l'on puisse donner à l'existence hautement improbable de l'atmosphère entourant la Terre résidait dans le fait que **cette atmosphère était quotidiennement produite à la surface de la Terre, et que l'agent producteur était la vie elle-même. La réduction significative d'entropie - ou pour employer le langage d'un chimiste, l'état persistant de déséquilibre parmi les gaz atmosphériques - était en soi une preuve évidente d'une activité vitale.**

Prenez par exemple la présence simultanée de méthane et d'oxygène dans notre atmosphère. A la lumière du soleil ces deux gaz réagissent chimiquement et donnent du dioxyde de carbone et de la vapeur d'eau... Si l'on excluait l'hypothèse d'une production biologique de ces deux gaz, il n'y aurait pas, selon le calcul des probabilités, une chance sur cent qu'ils puissent se trouver sur terre en quantités toujours suffisantes pour maintenir constante la composition de l'atmosphère...

Nos découvertes et conclusions étaient, bien entendu, marginales par rapport à la sagesse géochimique conventionnelle du milieu des années soixante. A quelques exceptions près ... la majorité des géochimistes considéraient l'atmosphère comme un produit final de l'émission de gaz planétaires et étaient convaincus que les réactions subséquentes par processus abiologiques avaient déterminé son état actuel... La vie empruntait simplement les gaz à l'atmosphère et les lui renvoyait non modifiés. **Notre conception opposé impliquait une atmosphère qui était une extension dynamique de la biosphère elle-même.... »**

Toutes choses que James Lovelock établira avec des résultats détaillés, en association avec Lynn Margulis, une éminente biologiste, qui se dissociera plus tard de son « hypothèse Gaïa ».

Ce qui lui permettra une première déduction (suite de notre citation) : « *A l'époque, nous connaissions déjà suffisamment l'atmosphère martienne pour déduire qu'elle consistait essentiellement en dioxyde de carbone et qu'elle ne révélait nulle trace de la chimie caractéristique de l'atmosphère terrestre ... le fait d'avoir réfléchi à la vie sur Mars donna à certains d'entre nous **une base nouvelle à partir de laquelle envisager la vie sur Terre nous a amenés à formuler - ou à faire revivre - un très ancien concept de relation entre la Terre et sa biosphère...** Il y a un long trajet à parcourir pour passer de l'élaboration d'une expérience plausible de détection de vie à l'émission de l'hypothèse voulant que l'atmosphère de la Terre soit préservée et régulée de manière active par la vie évoluant à sa surface, c'est à dire par la biosphère.* »

A la suite de quoi Lovelock établira son hypothèse Gaïa, vitaliste par définition : « *Travaillant dans un nouvel environnement intellectuel, je réussis à oublier Mars et à me concentrer sur la Terre et sur la nature de son atmosphère. Le résultat de cette approche plus concise fut le développement de l'hypothèse selon laquelle l'ensemble des êtres vivants sur terre - des baleines aux virus, des chênes aux algues - pouvait être considéré comme formant une entité vivante unique, capable de manipuler l'atmosphère de la Terre de manière à satisfaire ses besoins généraux et dotée de facultés et de pouvoirs supérieurs à ceux de ses parties constituantes... **Nous avons depuis lors défini Gaïa comme une entité complexe comprenant la biosphère terrestre, l'atmosphère, les océans et la terre.*** »

Nous ne commenterons pas de suite cette hypothèse Gaïa. Nous nous intéresserons d'abord à l'hypothèse première qui la supporte et à d'autres formulations qui se révèlent particulièrement importantes au regard de notre problématique.

Nous en viendrons ensuite à l'hypothèse Gaïa proprement dite.

3.2.2.1 Quand Lovelock nous apporte énormément

Lovelock entame sa réflexion « thermodynamique » sur le vivant sur les mêmes bases que celles que nous avons pu identifier dans notre point de vue thermodynamique. Partant de Schrödinger (et d'autres auteurs que nous n'avons pas étudié), sa réflexion sur l'entropie reflète parfaitement « le principe SBVB », puis la question des systèmes ouverts et enfin les travaux de Prigogine sur les structures dissipatives (tourbillons, ouragans, ...).

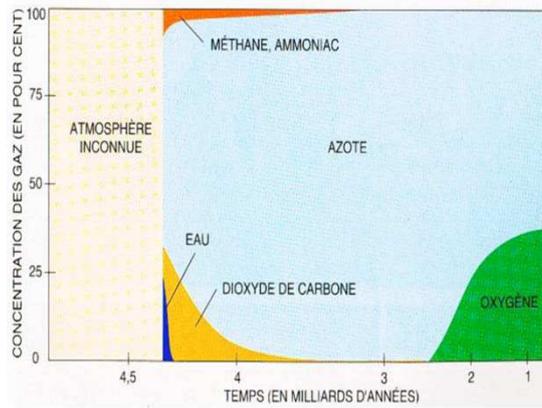
A partir de quoi seulement il amène, en réponse à nos propres interrogations, sa première hypothèse, pour laquelle il établira une démonstration : **L'atmosphère terrestre, notamment l'oxygène, est quotidiennement généré à la surface de la Terre, son agent producteur étant la vie elle-même.**

Cette hypothèse est pour nous fondamentale, pour au moins deux grandes raisons.

3.2.2.1.1 L'atmosphère terrestre, un produit « néguentropique » de la Biosphère

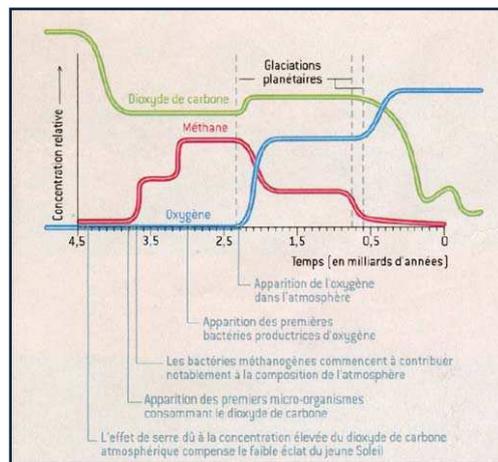
Depuis la fin des années 70, et au regard de toutes les publications auxquelles nous avons eu accès, la communauté scientifique semble avoir progressivement repris à son compte la première hypothèse de Lovelock. Avant d'étudier ce sujet plus en détail dans nos développements ultérieurs, nous montrerons pour mémoire les 3 figures suivantes, issues d'un document de vulgarisation (Histoire de l'atmosphère terrestre) établi par le laboratoire des sciences du climat et de l'environnement (LSCE) de l'Université de Versailles-St Quentin en Yvelines (UVSQ) :

Figure 2 : 1ère théorie d'évolution de l'atmosphère



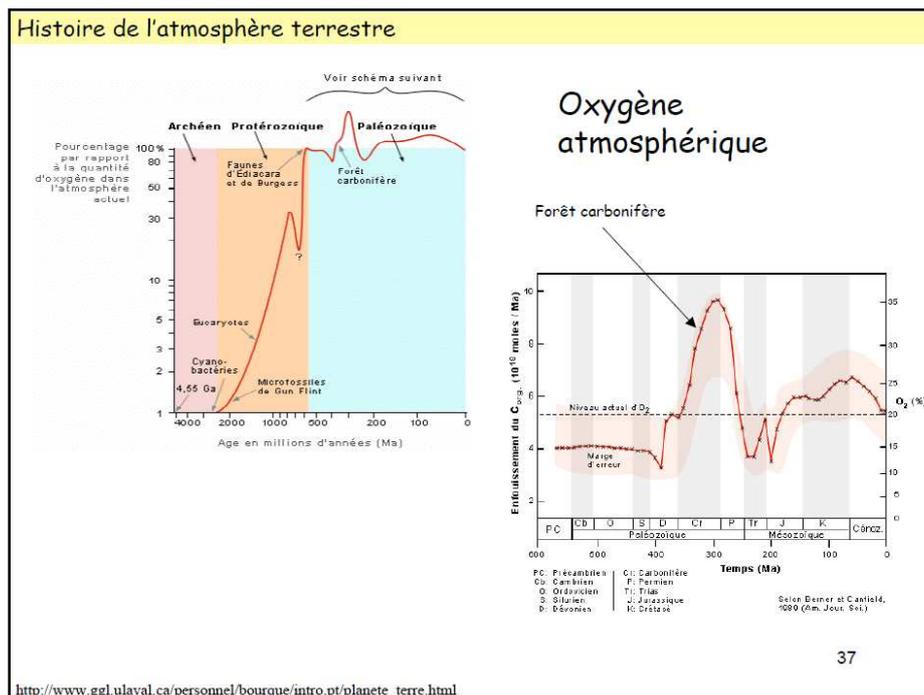
Source : Dossier l'atmosphère. Pour la science, éd. Belin, juin 1996

Figure 3 : Théorie récente d'évolution de l'atmosphère



Source : Kasting et al., 296, 2002

Figure 4 : Théorie récente d'évolution de l'oxygène atmosphérique



La figure 1 (théorie classique) reflète la position des géochimistes des années 60. La figure 2 (théorie récente) nous montre la relation établie depuis entre la baisse du méthane, puis du dioxyde de carbone, et l'augmentation corrélative de l'oxygène. La figure 3 traduit enfin une prise compte effective de la « première hypothèse » de Lovelock par la communauté scientifique, à savoir la production de l'oxygène par les bactéries. Une prise en compte, « hors hypothèse Gaïa », qui nous est bien confirmée par J.P. Deléage (2002, p.37).

Lovelock tendrait en l'occurrence à nous démontrer qu'il y aurait (nous restons encore au conditionnel) une activité « néguentropique » tout à fait spécifique à la biosphère, soit une exception au second principe qui pourrait complètement échapper aux exceptions « normalisées » identifiées dans notre point de vue thermodynamique, tel le principe SBVB.

Ou faudrait-il sinon élargir une fois de plus le principe de Carnot ?

3.2.2.1.2 De la Terre système « fermé » à la Biosphère système « ouvert »

Ainsi vérifiée et de plus en plus admise, cette « première » hypothèse de Lovelock nous permet de revenir à un autre constat désarmant de notre point de vue thermodynamique. A savoir la démonstration centrale de Georgescu-Roegen (1979), basée sur son postulat de la Terre comme système « clos » (fermé), donc entièrement soumise à la dégradation entropique, et qui aboutira sur son « quatrième principe thermodynamique » de dégradation entropique de la matière.

Georgescu-Roegen (1979, p. 121) : « *En effet la Terre est un sous-système non pas ouvert, mais clos, c'est-à-dire un système qui n'échange que de l'énergie avec son environnement. On peut illustrer un tel système par un anneau circulaire qui n'échangerait que de l'énergie avec le sablier univers* ».

Georgescu-Roegen (1979, synthèse pp. 40, 43, 44, 45, 62, ...) : « *La référence à un système clos est fondamentale. Car le second principe nous apprend que dans un tel système, l'énergie libre (basse entropie), se dégrade « irrévocablement » en énergie liée (haute entropie). C'est à dire que l'entropie d'un système clos croît constamment, ou que l'ordre d'un tel système se transforme continuellement en désordre.* »

Or a-t-on déjà vu dans un système « fermé » une modification interne de sa composition chimique telle que Lovelock nous le démontre ?, et à revers complet de l'évolution entropique ?

Au titre même du quatrième principe, il faudrait un apport continu de matière, sous forme d'énergie libre, pour que ce système fermé puisse ainsi modifier son atmosphère. Il lui faudrait donc s'ouvrir, de gré ou de force.

La Terre serait donc plutôt un système ouvert, avec les phénoménales conséquences qui suivent, dont nous devrions (à priori) à Lovelock de nous avoir mis sur la piste !

Nous ne sommes pas les premiers à faire cette remarque critique. C'est J. Grinevald, que l'on peut considérer comme l'un des biographes de Georgescu-Roegen, qui la fait lui même, de manière discrète et non polémique, dans son introduction à *La Décroissance*.

Grinevald (dans Georgescu-Roegen, 1979, p. 13, note 1) : « *On oublie souvent que même les cycles biogéochimiques ne sont pas complètement fermés, de sorte que la Biosphère (au sens de Vernadsky) est, dans la longue durée de sa coévolution biogéologique, un système thermodynamique ouvert dont le métabolisme global échange de la matière avec la Géosphère (la lithosphère possède une dynamique interne décrite par la théorie de la tectonique des Plaques).* »

Car Grinevald est proche à la fois de Georgescu-Roegen et de Vernadsky, le grand « biogéochimiste » russe, penseur de la « Biosphère ». Et son rapprochement entre les deux auteurs lui a forcément permis de comprendre que le premier avait été un peu trop « rapide » dans ses conclusions au regard des travaux du second, on comprendra plus loin pourquoi.

Ceci dit sa remarque est « extrêmement embarrassante » pour Georgescu-Roegen, car elle met en théorie « par terre » toute sa démonstration de *La Décroissance*, fondée sur la Terre vue comme système clos et sur son quatrième principe²⁶.

Mais comment Grinevald a-t-il pu intégrer des visions aussi différenciées chez deux auteurs dont il est proche ?

Là où Roegen parlait de la « Terre », Grinevald parle en fait de la « Biosphère », et toute la différence se fait là. C'est en s'autorisant à passer librement d'une vision spatio-temporelle très lointaine, voire cosmologique, de la Terre comme « vaisseau spatial » traversant le système solaire, à une vision très rapprochée et bien concrète de la Biosphère comme « domaine du vivant », que Grinevald a pu intégrer leurs contradictions.

Car les deux visions coexistent. Si vu de très loin le vaisseau Terre peut être effectivement conçue comme une sphère « fermée » tournant sur elle-même face au soleil, la Biosphère, est pour sa part un système ouvert, qui à ce titre reçoit énergie « & » matière.

Et nous allons avoir l'occasion d'y revenir, car cette citation à priori anodine de Grinevald nous introduit au concept de « Biosphère ». Il va devenir progressivement l'enjeu central de notre recherche d'exception au second principe, puis de sa découverte et de sa démonstration.

Nous procéderons désormais tout au long de ce travail en deux temps : l'étude des travaux d'un ensemble d'auteurs, et, à leur regard, la précision parallèle toujours plus approfondie du concept de Biosphère et de ses fonctions fondamentales. Ceci au point que notre étude de la Biosphère deviendra le sujet central de notre démonstration.

Car on ne saurait comprendre une exception du principe de Carnot sans comprendre le fonctionnement très particulier de la Biosphère !

Nous débiterons donc notre étude de la Biosphère par une première clarification sémantique de son concept. Il nous permettra de mettre ensuite un point final à notre étude de Lovelock.

3.2.3 Une problématique sémantique de la Biosphère

Remarquons que dans sa note de *La Décroissance* (Georgescu-Roegen, 1979, p. 13, note 1), Grinevald précisait : « de sorte que la Biosphère (au sens de Vernadsky) est... ».

Ce « au sens de Vernadsky » est loin d'être un détail vue l'immense importance prise par le concept de Biosphère dans les dernières décennies.

Il apparaît en effet qu'il existe de très grandes confusions quant à ses limites sémantiques exactes, desquelles son « type » de système (fermé, ouvert,...) dépend étroitement.

On ne saurait cependant reprocher à Georgescu-Roegen de ne l'avoir pris en compte, car il semble l'ignorer totalement, tout du moins dans *La Décroissance*, où la Biosphère n'est citée à aucun moment²⁷, sauf par Grinevald qui semble lui en faire au passage le très discret reproche.

3.2.3.1 Première clarification du concept

Grinevald parle en connaissance de cause, car il a eu lui-même l'occasion de faire une forte « mise au point » sémantique sur la Biosphère, lors d'un examen de ses rapports avec la « biodiversité ».

²⁶ Faut-il voir ici l'origine de la mésentente entre Georgescu-Roegen et Prigogine (Grinevald, 2006) ? Très probablement, car Prigogine a comme on l'a vu transformé l'entropie en principe d'espoir (ses structures dissipatives), quand Georgescu-Roegen a transformé cette même entropie en principe de désespoir (La Décroissance en temps que mouvement politique). Ce qui ne veut pas dire pour autant que nous suivions Prigogine dans ses déductions, et que cela remette en cause les apports fondamentaux de Georgescu-Roegen dans son approche « systémique » de l'économie.

²⁷ On apprendra en effet que *La Biosphère*, de Vernadsky, écrite en France, puis publiée en France en 1929 deux ans après sa publication en URSS, n'a été traduite en anglais et publiée aux Etats Unis qu'en « 1997 », avec une introduction de Jacques Grinevald. Ce qui nous explique « à priori » que ni Georgescu-Roegen, ni Lovelock lui-même, ne citent la Biosphère « selon Vernadsky ».

Reprenons l'essentiel de cette mise au point.

Grinevald (2002), seconde partie de : *LA BIOSPHERE : CONCEPT FONDAMENTAL DE L'ÉCOLOGIE GLOBALE* :

« ... L'enveloppe de la Biosphère est comme bombée à l'équateur et aplatie aux pôles. Mais nos connaissances sur les limites tout autant que sur la biodiversité de la Biosphère sont encore terriblement lacunaires. La géophysologie de Lovelock est une science pratique encore embryonnaire. Raison pour laquelle il faut se garder de jouer les apprentis sorciers. D'où le principe de précaution.

Hélas, largement diffusé depuis les années 60, le terme de biosphère circule avec une profusion de sens et de contresens. Ses origines et son évolution historiques sont généralement méconnues. Rappelons tout d'abord qu'il ne faut pas confondre les mots et les concepts. Curieusement, on préfère souvent, depuis la première prise de conscience de la "crise écologique", au tournant des années 60-70, le néologisme écosphère, ou d'autres expressions plus ou moins heureuses, mais qui toutes illustrent une flagrante ignorance de Vernadsky et des origines de l'écologie comme "science de la Biosphère". Il est vrai que le mot biosphère a été souvent utilisé en dehors de sa véritable perspective écologique, notamment par Teilhard de Chardin, pour qui la "Noosphère", constituée par "le phénomène humain", se développe "à partir et au-dessus de la Biosphère"!

*Les géochimistes, depuis V.M. Goldschmidt et B. Mason, donnent aussi au mot biosphère (comme Teilhard) le sens de somme totale des organismes vivants, autrement dit le biote ou la biomasse, ce que Vernadsky appelait la "matière vivante". C'est l'un des "réservoirs" du modèle géochimique de l'environnement global, en relation avec la lithosphère, l'hydrosphère et l'atmosphère. Jacques Monod, dans *Le Hasard et la Nécessité* (1970), parlait aussi de la biosphère en suivant cette définition tronquée de "l'arbre de la vie" qui n'est pas du tout écologique. Monod critiquait le holisme et l'anthropocentrisme de Teilhard, mais il suivait sa terminologie. Tout ce flou conceptuel et sémantique, qui n'est pas sans importance traduit en fait un dramatique déficit épistémologique, qui se retrouve dans les débats actuels sur la biodiversité, l'éthique environnementale, "l'écologie profonde" et le développement soutenable, viable ou durable.*

L'UNITÉ DE LA NATURE

*L'une des raisons majeures de cette situation, lourde de conséquences pratiques, est l'organisation de la science dans notre civilisation industrielle : la division du travail intellectuel en Facultés, départements et disciplines académiques aboutit à cette "spécialisation à outrance" déjà dénoncée en 1892 par Forel. Cette compartimentation de la science nous a fait perdre le sentiment de "l'unité de la nature", encore vivace chez les naturalistes du siècle dernier, et si admirablement illustré par Alexandre de Humboldt (1769-1859). Les exploits de la technoscience contemporaine ont mis en miettes la "science humboldtienne" du Cosmos, poursuivie malgré tout par quelques esprits encyclopédiques dans la grande tradition naturaliste qui remonte à Aristote. Dans mon historique de l'affaire de l'effet de serre de la Biosphère, j'ai utilisé ce dernier terme dans son sens écologique global, à savoir celui que lui donne l'enseignement du grand savant russe Vladimir Vernadsky (1863-1945), le créateur de la biogéochimie et l'auteur, en 1926, de la première monographie scientifique (en russe) sur La Biosphère, dont l'édition française date de 1929. Cette négligence de l'héritage scientifique de Vernadsky (les choses sont en train de changer) est associée à la confusion qui entoure le mot et le concept de Biosphère. Il faut se souvenir que l'origine de cette notion et la création du terme même remontent au petit livre *Die Entstehung der Alpen* publié par le géologue viennois Eduard Suess (1831-1914) en 1875. Toutefois, la diffusion de cette notion de biosphère (la géosphère de la vie) suit la publication du dernier tome du grand traité de Suess, *La face de la Terre*, publié en allemand en 1909 (traduction française en 1918). La notion de Biosphère est d'origine géologique et traduit l'impact de la révolution darwinienne sur les sciences de la Terre, sans oublier les idées de Lamarck et de quelques autres comme Buffon et Hutton. Prophétique est en effet la conception cyclique du "système de la Terre" de James Hutton (1726-1797), considéré de nos jours comme l'un des plus illustres prédécesseurs, avec Vernadsky, de la théorie Gaïa.*

DE L'HYPOTHÈSE À LA THÉORIE GAIA

A la suite de Suess, plusieurs auteurs, incompris de leur temps, des géologues et des naturalistes surtout, comme Teilhard et Vernadsky, ont utilisé et valorisé cette notion holistique de Biosphère,

mais avec des perspectives théoriques et des intentions philosophiques très diverses. Un même mot a donc masqué une évolution conceptuelle multiple et divergente. On a oublié qu'historiquement et logiquement le concept biogéologique et écologique de Biosphère, défini dans les années 1920 par Vernadsky, précède le concept d'écosystème, introduit nommément en 1935 par le botaniste anglais Arthur Tansley (1871-1955), et dont la fortune moderne date d'un article de 1942, dans la revue américaine Ecology, de Raymond Lindeman (1915-1942), lequel développait l'approche énergétique et biogéochimique de Vernadsky déjà adoptée par son maître George Evelyn Hutchinson (1903-1991), professeur de biologie à l'Université de Yale et véritable père de l'écologie scientifique moderne que j'ai appelé le « chaînon manquant » dans l'évolution intellectuelle qui va de Vernadsky à Gaïa.

*La fameuse théorie Gaïa, dont on discute sérieusement depuis 1988, éclaire rétrospectivement, et rénove, l'héritage de Vernadsky. Il devient clair désormais que **la Biosphère est le système écologique global intégrant tous les êtres vivants et les relations qu'ils tissent entre eux, avec les éléments chimiques de la lithosphère (les roches), de l'hydrosphère (l'eau) et de l'atmosphère (l'air), dans un métabolisme global qui transforme sans cesse la surface de la Terre.** Il faut donc imaginer l'homéostasie du grand métabolisme qui relie la Biosphère et la Géosphère, c'est pourquoi James Lovelock propose une médecine de la Terre : la "géophysologie". La conception vernadskienne de la Biosphère, adoptée par la science écologique, offre un cadre scientifique général pour le débat actuel sur la biodiversité et les changements climatiques. Cela est aussi valable pour l'économie mondiale, inséparable de l'environnement global. Voilà tout un débat de société qui dépasse la science proprement dite et qui implique une révision déchirante de nos modes de penser et de nos modes de vie. »*

Merci à J. Grinevald pour cette mise au point, même si nous avons pour notre part des réserves certaines concernant « l'hypothèse Gaïa », que nous allons bientôt exprimer. Sa définition finale de la Biosphère « selon Vernadsky » (la dernière partie en gras) nous est d'ailleurs confirmée par l'Académie des sciences (Académie des sciences, 2007, p.4) : « *Mais c'est W. Vernadsky qui, influencé par les idées de son maître BB. Dokouchaev, fondateur de la science des sols (pédologie), a été amené, dans les années 1920, à mettre en cohérence les différents savoirs en concevant l'existence d'une enveloppe autonome qu'il a identifiée à la biosphère ; celle-ci étant formée par l'ensemble des organismes vivants ainsi que par les divers milieux de la surface de la Terre qui leur sert d'environnement* ».

3.2.3.2 Premier découpage de la Biosphère

Nous retiendrons donc, à ce stade²⁸, cette dernière définition parfaitement claire de l'Académie des sciences, pour tenter de faire un premier découpage du concept.

Mais revenons à la notion de « système », sur laquelle Lovelock insistait suite à son étude des structures dissipatives (Lovelock, 1979, p.25) : « *Cependant même si cette classification est trop vaste et trop vague, elle nous indique la bonne voie. Elle suggère par exemple l'existence d'une limite, ou interface, entre la région « usine » où le flux d'énergie - ou les matières brutes - est employé et où l'entropie est en conséquence réduite, et l'environnement qui reçoit les déchets rejetés.* »

En croisant la dernière définition que nous venons de retenir avec cette notion de système, il apparaît qu'il existe bien une telle « frontière systémique » entre les êtres vivants et le milieu (leur « domaine » de développement, pour reprendre Vernadsky), duquel ils tirent leurs ressources et dans lequel ils rejettent leurs déchets non recyclés. La Biosphère comprendrait donc deux ensembles bien distincts :

- L'ensemble des êtres vivants au sein du milieu « dans lequel » ils existent directement (leur habitat spécifique), ensemble en expansion depuis les origines,
- Le milieu « à partir duquel » ils obtiennent toutes leurs ressources, et dans lequel ils rejettent tous leurs déchets non directement recyclés (le reste de l'environnement, élargi

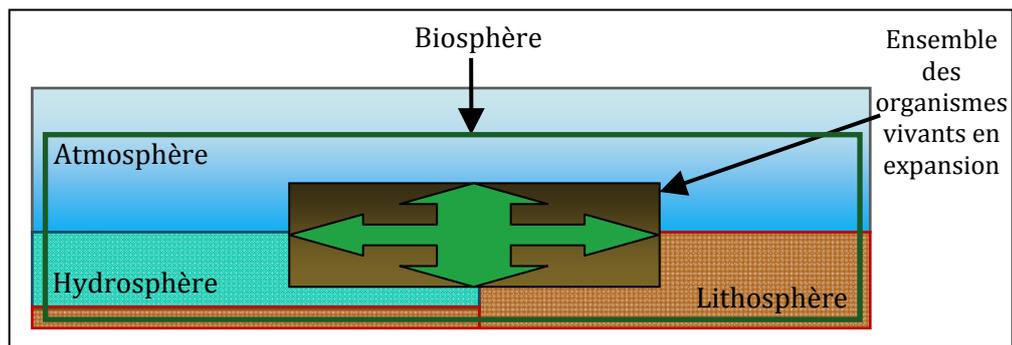
²⁸ Car nous allons revenir en profondeur sur tous les éléments constitutifs de la Biosphère dans le corps de notre étude, et notamment sur la notion d'organisme vivant chez Vernadsky.

au nord jusqu'à la couche d'ozone, cette dernière étant vue, tout comme l'oxygène, comme un déchet de l'activité du vivant).

Ainsi la Biosphère comprend bien une très grande partie de l'atmosphère, et une partie encore plus importante de la lithosphère et de l'hydrosphère. C'est un « sur-système » qui, regardé à l'intérieur de ses frontières extrêmes, intégrerait le sous-système des organismes vivants « en expansion ».

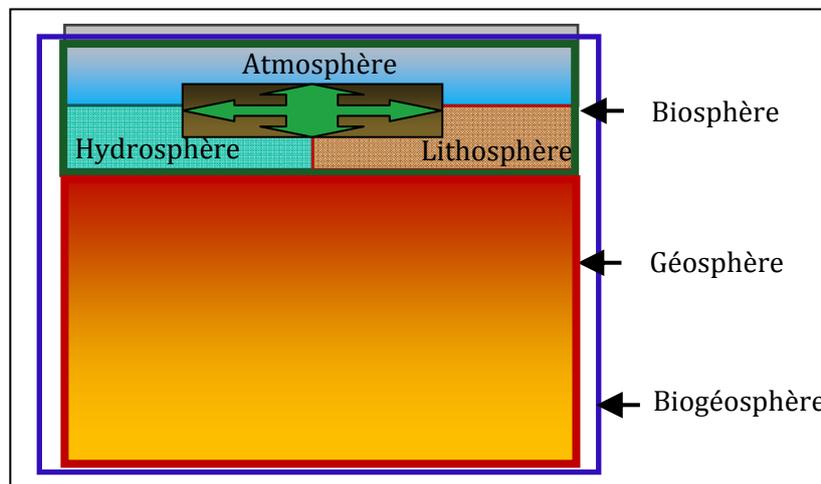
Nous pouvons dès lors nous faire une première représentation de la Biosphère, en cohérence avec les définitions précédentes :

Figure 5 : La Biosphère, « domaine » du vivant



Ce qui nous permet d'autant de la représenter dans sa relation avec la Géosphère :

Figure 6 : Biosphère et Géosphère, ou Biogéosphère



Nous pouvons maintenant comparer ces précisions sémantiques aux définitions de Lovelock quant à « Gaïa ».

3.2.4 « Gaïa » et le renouveau de la controverse vitalo-mécaniste

3.2.4.1 Une éclipse lunaire de la Biosphère

Reprenons nos citations (Lovelock, 1979, p.32): « **Nous avons depuis lors défini Gaïa comme une entité complexe comprenant la biosphère terrestre, l'atmosphère, les océans et la terre.** »

Posant la biosphère « à côté » de l'atmosphère, de la lithosphère et de l'hydrosphère, Lovelock introduit une confusion laissant entendre qu'il ne donne à la « Biosphère »²⁹ que le seul sens de « **somme totale, ou ensemble, des organismes vivants** » (comme Teilhard de Chardin³⁰ et bien d'autres après lui).

Nous pourrions penser que ce n'est qu'un détail, mais un vrai problème émerge quand il apparaît que cette confusion sous tend une autre conception selon laquelle « Gaïa » représente un ensemble qui intègre la biosphère (comme ensemble des êtres vivants) « plus » l'atmosphère, les océans et la terre, c'est à dire les divers milieux de la surface de la Terre qui leur servent d'environnement. Il donne ainsi à Gaïa la même définition que la Biosphère de Vernadsky, telle que précisée par l'Académie des sciences, quand bien même il restreint simultanément le sens de cette dernière.

La chose est remarquable car ainsi le concept de « Gaïa » selon Lovelock tend purement et simplement à « éclipser » celui de « Biosphère » selon Vernadsky (tout en donnant à Gaïa le caractère de « super organisme », ce que ne fera jamais Vernadsky).

Dit autrement, Gaïa serait une reprise purement « vitaliste » de la Biosphère selon Vernadsky.

La chose est-elle volontaire ? Nous voici en tous cas dans une confusion sémantique telle, que Lovelock a pu réaliser une véritable « transposition » entre deux concepts parmi les plus remarquables du dernier siècle.

Ce qui constitue en soi un retour direct à notre vieille controverse vitalo-mécaniste !, et ce qui explique pour partie la confusion sémantique générale autour du concept de Biosphère.

3.2.4.2 Pour en finir avec la paternité des hypothèses soutenant Gaïa

Comment Lovelock a-t-il pu ignorer à ce point Vernadsky ? Même si la traduction anglaise tardive de *La Biosphère* l'explique en partie, ses profondes recherches préliminaires, dont il témoigne lui-même, ne nous expliquent pas comment il a ainsi pu passer « à côté ».

Ceci d'autant que le grand naturaliste et écologue américain G. E. Hutchinson, cité par Lovelock lui-même (Lovelock, 1979, chapitre 6), qui fut un des rares américains à avoir eu un accès direct aux travaux de Vernadsky, était considéré alors comme le véritable continuateur de l'œuvre de Vernadsky (Deléage, 2002). Etudiant Hutchinson, on ne voit maintenant plus du tout comment Lovelock, passant cette fois bien à côté de Vernadsky, aurait ainsi pu « passer sans le voir ».

Ceci pourrait nous être expliqué à priori par J. Grinevald, encore une fois, qui a écrit l'introduction de la traduction anglaise de *La Biosphère : The Biosphere* (Grinevald, 1997).

Dans cette introduction, titrée : *L'invisibilité de la révolution vernadskienne*, il nous dit comment dans les années 60, la guerre froide a établi comme un mur étanche entre la pensée scientifique de l'Est et celle de l'Ouest, ce qui expliquerait que les travaux de Vernadsky aient si longtemps été ignorés aux Etats Unis (oui mais, sauf Hutchinson !).

Quoique dans le même temps, il nous rappelle la « Biosphere Conference » organisée à Paris par l'UNESCO en septembre 1968, qui posa à travers son programme « MAB » (Man and Biosphère), la problématique mondiale de « L'homme et la Biosphère », et finira par aboutir sur la 1ere Conférence des Nations Unies sur l'Environnement et le Développement (CNUED), à Stockholm,

²⁹ Une convention internationale implicite veut que quand on se réfère à la Biosphère, selon Vernadsky, on l'écrive avec un « B ». Raison pour laquelle nous utilisons volontairement un « b » pour les autres versions.

³⁰ Qui aurait donc mal écouté les cours de Vernadsky à la Sorbonne, dont il fut l'étudiant.

en 1972. Ceci en précisant que derrière ces conférences, les travaux de Vernadsky étaient implicitement ou explicitement présents. Et ce n'est qu'après la Pérestroïka de Gorbatchev, au milieu des années 80, que la pensée de Vernadsky aurait commencé de nouveau à se diffuser à l'Ouest.

Donc le mystère reste complet !, d'autant que la préface de cette même traduction anglaise de *La Biosphère* est signée par Lynn Margulis, la partenaire de Lovelock dans la vérification de son hypothèse concernant l'atmosphère.

Ceci dit, que nous explique Lovelock quant aux antécédents de cette hypothèse ?

Reprenons nos citations. (Lovelock, 1979, p. 28-30) : « *Le fait d'avoir réfléchi à la vie sur Mars donna à certains d'entre nous une base nouvelle à partir de laquelle envisager la vie sur Terre nous a amenés à formuler - ou à faire revivre - **un très ancien concept de relation entre la Terre et sa biosphère...** Il y a un long trajet à parcourir pour passer de l'élaboration d'une expérience plausible de détection de vie à **l'émission de l'hypothèse voulant que l'atmosphère de la Terre soit préservée et régulée de manière active par la vie évoluant à sa surface, c'est à dire par la biosphère.** »*

Long trajet ou circonvolution ? Il est pour le moins « très étonnant » de constater que ce « très ancien concept »³¹ n'a à l'époque pas plus de 50 ans d'âge, datant au plus tôt de 1917 et au plus tard de 1927 (année de première parution de « *Biosphera* », la version russe de *La Biosphère*).

Et que c'est bien plus qu'un concept, d'autant plus « vague » qu'il est ancien, puisque Vernadsky, dans *La Biosphère*, formule « entièrement » le principe fondamental duquel Lovelock va extraire Gaïa. Ceci non pas en forme d'hypothèse, mais selon un principe de « généralisation empirique » que nous aurons l'occasion d'étudier.

Avant d'entamer le troisième de nos points de vue, et en forme d'introduction à ce dernier, nous clôturerons donc l'actuel en faisant une brève revue de ce que dit Vernadsky concernant cette hypothèse de Lovelock. Ceci à partir de quelques extraits qui se passent de commentaire.

Vernadsky (1929, p.62) : « *Il est très caractéristique que l'absorption principale de ces rayons (les ultra violets) est liée à l'ozone (écran ozoné...), dont la formation est déterminée par l'existence de l'oxygène libre, produit de la vie.* »

p.76 : « *...avec l'extinction de la vie, l'oxygène libre disparaîtrait aussi et la masse de l'acide carbonique diminuerait extrêmement.* »

p.104 (les parties en gras sont en italique dans le texte original) : « *Il ne peut exister d'organismes sans échange gazeux, sans respiration... On peut toujours juger de l'intensité de la vie par la puissance de l'échange gazeux... Il existe depuis longtemps dans ce domaine, des généralisations empiriques qui n'ont jusqu'à présent que peu attiré l'attention et dont la pensée scientifique n'a pas suffisamment tenu compte.*

*La première de ces généralisations indique que **les gaz de la biosphère sont identiques à ceux créés par l'échange gazeux des organismes vivants.** Ce sont ces gaz seuls qui, en quantité notable, existent dans la biosphère : O₂, N₂, CO₂, H₂O, H₂, NH₃. Le fait ne peut être accidentel.*

*D'autre part, **tout l'oxygène libre de la biosphère n'est créé à la surface terrestre que par suite de l'échange gazeux des plantes vertes.** Cet oxygène libre est la source principale de l'énergie chimique libre de la biosphère.*

Enfin, la quantité de cet oxygène libre dans la biosphère, égale à 1.5 x 10²⁰ grammes, est un nombre du même ordre que la quantité de matière vivante qui existe, et est liée à elle par un lien indissoluble ; elle est évaluée à 10²⁰-10²¹ grammes. Ces deux évaluations ont été obtenues indépendamment l'une de l'autre.

*Ce lien étroit des gaz terrestres avec la vie démontre indubitablement que l'échange gazeux des organismes, en premier lieu leur respiration, doit avoir une importance primordiale dans le régime gazeux de la biosphère, autrement dit : **être un phénomène planétaire.** »*

p.173-174, parlant des « organismes autotrophes verts » : « *Ils effectuent sur l'écorce terrestre le*

³¹ En réalité, nous avons depuis constaté que c'est Vernadsky lui-même qui fait référence à ce très ancien concept.

travail chimique le plus important ; ils créent l'oxygène libre, détruisant par photosynthèse des corps oxydés aussi stables, aussi universels que l'eau et l'acide carbonique. Ils ont indubitablement produit ce même travail à travers les lointaines périodes géologiques. Les phénomènes d'altération superficielle démontrent clairement qu'à l'époque archéozoïque, l'oxygène libre a rempli absolument le rôle éminent qu'il joue dans la biosphère actuelle... le monde végétal vert a été dans ces temps lointains la source de l'oxygène libre dont la masse était de même ordre que celle d'aujourd'hui. »

p.196 : « *La vie créant l'oxygène libre dans l'écorce terrestre, crée par là même l'ozone et protège la biosphère des rayonnements perniciose des ondes courtes des astres célestes. »*

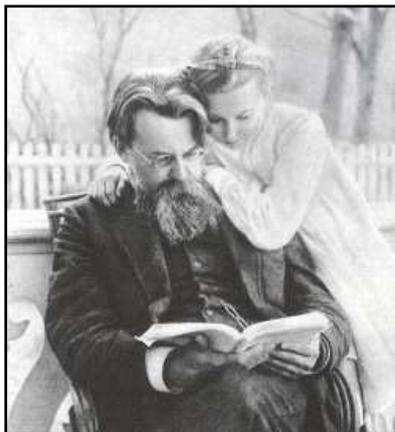
Et puis (Vernadsky, 1943) : « *L'existence de l'oxygène libre de notre atmosphère et des eaux est l'expression de la fonction chlorophyllienne. Tout l'oxygène libre du globe est un produit des plantes vertes. Si les plantes vertes n'existaient pas, dans quelques centaines d'années il ne resterait à la surface terrestre aucune trace de l'oxygène libre et les transformations chimiques y auraient pris fin. »*

Tout est dit ! Et il vient bien au final que Lovelock, sans mettre pour autant en cause l'apport très important que constituent ses démonstrations, n'est pas le père des « hypothèses³² » scientifiques sur lesquelles il fondera sa théorie, vitaliste, de Gaïa.

Et comme nous avons toujours reçu ce très bon conseil : « il vaut mieux s'adresser à Dieu qu'à ses saints ! », eh bien nous allons le mettre immédiatement en pratique !

³² Hypothèses qui reviendraient à « réduire » (dans un sens « réductionniste ») ces points de vue, fondamentaux pour la science, que Vernadsky nommera pour sa part des « généralisations empiriques ».

3.3 Le point de vue de « Vernadsky » (1863-1945)



Vernadsky et sa fille Nina, vers 1900

3.3.1 Le dernier humaniste

Qui est Wladimir Vernadsky ? Pour y répondre, nous recommanderons la lecture de l'introduction à l'édition 2002 de son seul ouvrage connu en Occident (Vernadsky, 1929), ou mieux encore, sa seule biographie approfondie disponible en Occident (Bailes, 1990).

Reprenons cependant la brève présentation qu'en fait l'Académie des sciences (2007) : « *Mais c'est W. Vernadsky qui, influencé par les idées de son maître BB. Dokouchaev, fondateur de la science des sols (pédologie), a été amené, dans les années 1920, à mettre en cohérence les différents savoirs en concevant l'existence d'une enveloppe autonome qu'il a identifiée à la biosphère ; celle-ci étant formée par l'ensemble des organismes vivants ainsi que par les divers milieux de la surface de la Terre qui leur sert d'environnement. Dès 1924, en effet, dans le cours sur la géochimie, qu'il a dispensé à la Sorbonne, Vernadsky a proposé une extension de la géochimie aux êtres vivants, celle-ci devant dorénavant s'appuyer aussi sur la géochimie organique et la biochimie. De ce fait, il a fait appel aux biologistes pour que les phénomènes vitaux soient rattachés à la géochimie, le sol, en tant que maillon d'entrée de la chaîne alimentaire, servant de lieu privilégié pour assurer les échanges d'atomes entre le monde vivant et le monde inerte.... À partir de là, ces auteurs se sont intéressés à ce qui constitue désormais la « biogéochimie » et ont été les premiers à proposer la notion de « cycles biogéochimiques » (appelés par eux cycles inorganiques-organiques) et à l'appliquer à plusieurs éléments, tels le carbone, le phosphore, le strontium (thèse d'Odum en 1950).* »

Et complétons là de quelques éléments relatifs à sa réflexion personnelle et à son implication sociale, tirés des différentes biographies que nous avons pu consulter.

Vernadsky, qui a fait ses études à Saint-Pétersbourg, et fut aussi l'élève de D.I. Mendéléiev, fut par ailleurs un « libéral humaniste » très impliqué (comme le fut aussi Tolstoï, son compatriote) dans les mouvements intellectuels et politiques russes de la fin du XIXe siècle militant pour l'égalité, la libération et l'instruction des serfs, et l'instauration des droits démocratiques.

Et il fera donc tout pour appliquer ses positions, dans les « sciences dures » certes, mais les plus proches possible du « sol » et des mouvements sociaux, tout comme Tolstoï, qui fut très impliqué dans l'étude approfondie et l'écriture d'ouvrages agronomiques, en même temps que dans l'éducation des paysans libérés du servage en 1861, et alors profondément ignorants. Malgré leur différence d'âge (35 ans), et compte tenu de leur proximité de pensée, Vernadsky aurait pu avoir avec Tolstoï des relations étroites qu'il serait intéressant de vérifier. Tout comme il serait fort enrichissant de comparer la « grande pensée » de Vernadsky à celle de Tolstoï, et d'étudier plus avant l'influence qu'aurait pu avoir le second sur le premier.

Car il s'agit bien chez Vernadsky, que ses compatriotes nommaient le « dernier humaniste » (<http://vernadsky.fr/biographie.html>) d'une telle pensée, la seule apte à fonder le concept d'« Ecologie globale », capable de se représenter puis de décrire le fonctionnement intégré de la Terre et du « monde vivant » de la Biosphère, dans ses relations « complexes » et l'évolution de

ses grandes ères géologiques. Tout comme Tolstoï, professeur de Gandhi en non violence, qui fut capable de penser et de décrire en un geste unique, tout aussi bien historique que poétique et philosophique, le mouvement d'ensemble de l'épopée napoléonienne en Russie. Et chacun avec son luxe de précision inouï.

Et quand J.P. Deléage, dans son introduction à la nouvelle édition française de *La Biosphère* (Deléage, 2002) nous parle des grands atouts de la « révolution vernadskienne », il nous dit très bien en quoi cet ouvrage se présente comme une « *synthèse transdisciplinaire qui ouvre véritablement un nouveau champ de recherche* ». Elle est propre à offrir selon nous des bases terriblement solides à cette nouvelle « épistémè » tant souhaitée de la production écologique (O'Connor, 1994).

Mais il oublie cependant de nous préciser en quoi Lovelock, après le brouillard soviétique, aura diffusé lui aussi « comme un brouillard », plutôt américain cette fois (quoique Lovelock soit anglais), sur ce nouveau champ - et sur les travaux de Vernadsky - en retournant vers sa propre personne ce que ce dernier proposait comme « la vision d'une terre vivante » ouverte et offerte à tous.

Voilà peut être le seul vrai problème du vitalisme (comme de la fausse autorité) : il fabrique du culte de la personnalité là où une véritable autorité transmet gratuitement à l'être collectif les résultats de son expérience comme un parent transmet son héritage : aux fins de le faire fructifier.

Nous noterons cependant que l'édition américaine de *La Biosphère*, préfacée par Lynn Margulis et introduite par Jacques Grinevald, participe activement à la dissipation de ce brouillard, en faisant notamment une présentation synthétique de son contenu qui, pour notre part, nous convient parfaitement :

« La vie a été la force de transformation géologique de notre planète, qui explique la différence entre une vue minéralogique inanimée de l'histoire de la Terre, et une image dynamique aux prolongements infinis de la Terre comme domaine et produit de la matière vivante. Ce que Darwin a fait pour la vie à travers le temps, Vernadsky l'a fait pour toute la vie à travers l'espace. »

3.3.2 Dépasser la controverse vitalo-mécaniste

Nous avons dit au long des pages que nous ne voulions pas prendre position dans la controverse vitalo-mécaniste. Il nous est apparu en effet plus que primordial de la « dépasser », en regard de l'intérêt public d'une prise en compte du vivant devenue plus qu'essentielle face aux enjeux de la crise globale.

Or Wladimir Vernadsky, homme d'une autorité à ce point vraie qu'il sut l'affirmer face au pouvoir soviétique, nous justifie et mieux encore nous montre à son niveau le modèle de la position qui saura dépasser cette controverse.

Ce n'est pas du tout un vitaliste au sens de Lovelock ; c'est plutôt un « humaniste vital », un intellectuel engagé, qui « pense avec les mains » (De Rougemont, 1936), au sens que nous révèle Tolstoï dans les grands chapitres de ses ouvrages, nombreux dans *Guerre et Paix* et peut être plus encore dans *Anna Karénine*, relatifs à la bonne gestion de notre « domaine agricole ». Tolstoï fut lui aussi très proche des positions physiocrates de Rousseau et de l'abbé Rozier.

Et Vernadsky a eu l'occasion de préciser son opinion, tant vis à vis du vitalisme que des sciences matérialistes, dans un paragraphe de *La Biosphère* qui a par ailleurs l'immense avantage de nous expliquer son positionnement scientifique général.

Extraits (Vernadsky, 1929, p.66-67) : « *Tous les jugements des naturalistes les plus exacts ont au cours des siècles, subi dans ce domaine (il parle alors de l'étude de la vie), l'influence de cet embrassement du Cosmos par des conceptions de la pensée humaine qui, d'une nature parfois étrangère à la science, n'en sont pas moins précieuses et profondes par leur essence. Une grande difficulté s'en est suivie de maintenir dans ce domaine de phénomènes les procédés d'investigation scientifique pratiqués dans les autres domaines.*

Les deux représentations dominantes de la vie, vitaliste et matérialiste, sont aussi les reflets d'idées philosophiques et religieuses de ce genre et non de déductions tirées de faits scientifiques. Ces deux représentations entravent l'étude des phénomènes vitaux, et troublent les généralisations empiriques.

Les représentations vitalistes donnent aux phénomènes vitaux des explications étrangères au monde des modèles sous la forme desquels nous élevons par généralisation scientifique l'édifice du Cosmos. Le caractère de ces représentations enlève leur portée créatrice dans le domaine scientifique et les rend infructueuses. Les représentations matérialistes qui ne saisissent dans les organismes vivants qu'un simple jeu des forces physico-chimiques, ne sont pas moins funestes. Elles restreignent le domaine de la recherche scientifique en empiétant sur son résultat final ; en y introduisant la divination, elles obscurcissent la compréhension scientifique. En cas de divination heureuse, l'élaboration se serait vite débarrassée de tous les obstacles. Mais la divination était liée trop étroitement à des constructions philosophiques abstraites, étrangères à la réalité qu'étudiait la science. Ces constructions amenaient à des représentations de la vie trop simplistes et détruisaient la notion de complexité des phénomènes. Cette divination n'a, jusqu'à présent pas avancé notre compréhension de la vie.

Ainsi nous considérons comme fondée la tendance toujours plus dominante des recherches scientifiques à renoncer à ces deux types d'explication de la vie ; à étudier ses phénomènes par des procédés purement empiriques ; à se rendre compte de l'impossibilité d'expliquer la vie, c'est à dire de lui assigner une place dans notre Cosmos abstrait, édifice scientifiquement composé de modèles et d'hypothèses.

On ne peut actuellement aborder avec quelque garantie de succès les phénomènes de la vie que d'une façon empirique, sans tenir compte des hypothèses. C'est la seule voie pour découvrir des traits nouveaux en ces phénomènes, traits qui élargiront le domaine des forces physico-chimiques actuellement connues, ou y introduiront (de front avec les principes constructeurs de notre univers scientifique) un principe ou un axiome nouveau, une nouvelle notion, qui ne peuvent être ni entièrement prouvés, ni déduits des axiomes et des principes connus. C'est alors qu'il sera possible en se basant sur des hypothèses nouvelles, de relier ces phénomènes à nos constructions du Cosmos, comme la radioactivité avait relié ces dernières au monde des atomes ».

Ainsi la « généralisation empirique » serait le contrepied direct des représentations tout autant mécanistes que vitalistes, qui rendent infructueuse leur portée créatrice potentielle dans le domaine scientifique. Quand on a vu ce qu'il en est des origines de l'hypothèse Gaïa, Vernadsky n'a alors jamais cru si bien dire !

Mais d'où tenait-il une telle « position scientifique », dans ce passage en forme de déclaration qui semble s'adresser à la France, patrie à la fois du matérialisme et du vitalisme, et donc patrie de la controverse vitalo-mécaniste ?

3.3.2.1 Premier séjour en France, application de la thermodynamique à la chimie

3.3.2.1.1 Henri Le Chatelier (1850-1936) et Josiah Willard Gibbs (1839-1903)

Vernadsky a fort bien connu certaines grandes personnalités du monde scientifique français de la fin du XIXe siècle et du début du XXe.

Lors d'un premier séjour en France, de février 1889 à juillet 1890, cet élève de Mendéléiev travailla, tout d'abord, auprès du chimiste Henry Le Chatelier, 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. Ce principe joue aujourd'hui un rôle important dans la définition du principe de « stabilité » des systèmes ouverts. Lovelock notamment a pu construire son hypothèse de stabilité du climat à partir de ce principe.

Et c'est Le Chatelier qui le poussa à utiliser les principes mathématiques pour mieux comprendre la chimie. Et notamment à suivre la voie tracée par l'américain Josiah Willard

Gibbs³³, qui a appliqué les principes thermodynamiques à la chimie et a défini la fonction « Enthalpie libre », dite aussi « Energie libre de Gibbs », qui caractérise la fonction de captage et de stockage de l'énergie solaire par les systèmes vivants autotrophes, qui joue un si grand rôle dans *La Biosphère*.

Mais Le Chatelier ira plus loin en mettant le doigt sur la tendance de Vernadsky à faire de trop larges spéculations théoriques dans le domaine scientifique, et en l'engageant à n'utiliser que des concepts fondés sur l'observation empirique et l'expérimentation. Ce qui orientera les préférences de Vernadsky sur cette approche scientifique qu'il nomme « généralisation empirique », qui lui permettra de s'élever au dessus de la controverse vitalo-mécaniste.

3.3.2.1.2 La « généralisation empirique »

Vernadsky (1929, paragraphe 15, p. 69) : « *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. »

3.3.2.1.3 Ferdinand Fouqué (1828-1904)

Vernadsky travailla ensuite auprès de Ferdinand Fouqué, minéralogiste et professeur d'histoire naturelle au Collège de France, qui fut le premier à introduire en France les méthodes pétrographiques modernes. C'est auprès de lui qu'il étudiera les phénomènes volcaniques, les séismes, les minéraux et roches éruptives, les phénomènes de sédimentation, ..., dont le rôle dans les « cycles biogéochimiques » ressort si fortement dans *La Biosphère*, et qu'il pratiquera des expériences de synthèse chimique des minéraux. Il sera fier d'annoncer un jour à son mentor, Dokouchaev, qui dirigeait sa thèse (Bailes, 1990, p. 45) : « *J'ai commencé à travailler avec Fouqué dans son laboratoire du Collège de France sur les composés Al_2O_3 et SiO_2 , et cela a produit des résultats évidents ; il semble que j'ai produit de la sillimanite, jusqu'à présent jamais produite synthétiquement.* ».

³³ Ses plus importants travaux ont été publiés sous le titre *Équilibre des substances hétérogènes* (1876-1878) et constituent la base de la thermodynamique chimique.

3.3.2.2 Second séjour en France ou : Quand la vie « pourrait bien » faire exception au principe de Carnot...

La Biosphère fut publié en 1927 à St Pétersbourg, devenue entretemps Leningrad, juste au sortir d'un second séjour de Vernadsky à Paris, qui dura quatre années (1922-1926). Séjour au cours duquel, travaillant avec Marie Curie dans son laboratoire, donnant des séminaires à la Sorbonne³⁴, il publia *La Géochimie* (1924), ouvrage regroupant ses conférences à la Sorbonne, et termina le manuscrit en français de *La Biosphère* (<http://vernadsky.fr/biographie.html>).

Il avait l'intention de s'établir en Occident pour y créer un grand laboratoire d'étude des cycles « biogéochimiques », mais sa proposition de créer un tel laboratoire au Muséum d'histoire naturelle, à Paris, n'aboutira pas, pour des raisons que nous ignorons.

3.3.2.2.1 Matière vivante et dissymétrie de Pasteur

C'est au cours de ce second séjour qu'il eut l'occasion de compléter et synthétiser les aspects « thermodynamiques » de sa vision de la Biosphère. Et plusieurs faits tendent à nous démontrer qu'il le fit plus particulièrement au regard du « principe de Carnot ».

Il avait quelques années auparavant, dans les jours mêmes de la révolution d'octobre, dégagé le concept de « matière vivante », que nous étudierons dans les paragraphes ultérieurs.

Désormais centré sur la matière vivante et son produit, la matière « biogène », que nous étudierons aussi, c'est très probablement auprès de Marie Curie qu'il développa sa compréhension de « l'énergie libre terrestre », dégagée par les substances radioactives.

Mais il eut aussi auprès d'elle accès au journal de Pierre Curie (Vernadsky, 1930, p. 13) dans lequel il découvrit le concept de « **dissymétrie** », de Pasteur, que Pierre Curie avait repris et continué à approfondir.

Citons à ce sujet quelques extraits d'un grand article de Vernadsky qui fit l'objet en 1930 d'une conférence à la Société des naturalistes de Moscou et de Leningrad.

(Vernadsky, 1930, pp. 13-14) : « *La dissymétrie de la matière vivante fut découverte il y a de ça plus de 80 années - en 1848 - par l'un des plus grands savants du dernier siècle, Louis Pasteur³⁵, qui éclaircit toute son importance pour la structure scientifique de l'Univers. Pasteur conçut la dissymétrie comme un phénomène cosmique et en tira des conclusions très importantes pour la connaissance de la vie.*

*Ses travaux doivent attirer aujourd'hui l'attention la plus assidue de la nouvelle physique. Il est plusieurs fois revenu à ces idées en les approfondissant toujours davantage. Il y est revenu la dernière fois sous une forme suivie, en 1883, il y a de ça quarante-six ans³⁶ et a regretté de ne pouvoir pas s'y approfondir expérimentalement ; **il considérait cette découverte comme l'œuvre la plus importante de toute sa vie**, comme la pénétration la plus profonde de son génie dans les problèmes de la science. La destinée de ses idées fut étrange ; l'idée principale que Pasteur ressortit n'a pas pénétré jusqu'aujourd'hui dans la pensée scientifique. L'opinion publique des chimistes l'a reconnue douteuse dans ses fondements ... Il me semble que cela dépend du fait que les chimistes n'ont jamais tenu compte dans toute son ampleur de la notion de dissymétrie, sur laquelle Pasteur s'est appuyé, et que cette notion n'a pas été comprise par ses contemporains.*

*Elle fut soumise à une analyse profonde par un autre français génial, Pierre Curie, en 1894. La formulation des idées de P. Curie est exceptionnellement concise, ce qui pouvait les faire paraître abstraites, mais son théorème principal — sur la dissymétrie — ne permet aucun doute et est évident pour le naturaliste dans son importance concrète. Il dit « **Les éléments de symétrie des***

³⁴ Teilhard de Chardin, qui fit ses études à la Sorbonne pendant ces mêmes années, sera très marqué par ses enseignements, mais nous avons vu qu'il n'avait pas pour autant mieux compris le concept de Biosphère.

³⁵ Les travaux de Pasteur dans ce domaine ont abouti, quelques années plus tard à la naissance du domaine de la stéréochimie avec la publication de l'ouvrage *La Chimie dans l'Espace*, par Van't Hoff qui, en introduisant la notion d'asymétrie de l'atome de carbone a grandement contribué à l'essor de la chimie organique moderne [http://fr.wikipedia.org/wiki/Louis_Pasteur#D.C3.A9couverte_de_la_dissym.C3.A9trie_mol.C3.A9culaire].

³⁶ Ce qui nous indique que cet article fut écrit à la fin de 1929, trois années à peine après son départ de France.

causes doivent se retrouver dans les effets, les éléments de dissymétrie des effets doivent se retrouver dans les causes. » Ce principe de Curie résout la dispute irrévocablement en faveur de Pasteur, dans la partie de ses affirmations demandant à rechercher la cause de la dissymétrie des corps naturels dans les phénomènes de la vie. La destinée des travaux de Curie fut dans ce domaine analogue à celle de Pasteur. Empêché par la découverte de la radioactivité il revint avant sa mort en 1906, il y a de ça 23 ans, aux travaux sur la symétrie ; à juger d'après ses notes de journal il était arrivé à de grandes généralisations dans ce domaine. Après sa mort - il fut écrasé par un charretier dans la rue à Paris - personne ne saisit le fil qu'il laissa échapper de l'analyse physique ultérieure du principe de la symétrie, analyse qui nous préoccupe particulièrement aujourd'hui.

L'herbe de l'oubli a recouvert la voie battue par Pasteur et Curie. Il me semble que c'est précisément par là que la vague du travail scientifique doit monter maintenant. »

3.3.2.2 Une « thermodynamique du vivant » très problématique

Vernadsky se posait donc dès 1922 des questions sur la matière vivante à un niveau qui le rapprochait pour beaucoup de celles de Schrödinger 20 ans plus tard.

Son premier séjour en France lui avait permis d'étudier de nouvelles lois sur l'équilibre chimique, l'énergie libre, la mathématisation des sciences naturelles,... et nous pouvons penser que c'est dans cette même dynamique qu'il suivit alors de près les évolutions de la physique, comme la théorie émergente des quantas, la mécanique ondulatoire, les processus irréversibles.

Il en témoigne dans cette même conférence de 1930 où il appelle à suivre les voies d'une « nouvelle physique » susceptible de rendre compte du vivant (Vernadsky, 1930).

Et s'il découvrait, discutait et/ou formulait avec ses confrères, dans les cercles qu'il fréquentait alors, toutes ces nouvelles théories, ses conclusions auraient bien pu être alors fort différentes.

N'oublions pas en effet que comme chimiste, pédologue, et élève de Le Chatelier, il se fondait alors sur une appréciation du vivant, proche des constats de l'expérimentation, qui lui permettait de déduire de l'ensemble de ces questions des « généralisations empiriques » dont les conséquences auraient pu lui permettre de remettre en cause quelques certitudes établies.

C'est d'ailleurs peu avant son premier séjour que Maxwell avait imaginé en 1872 son « démon », quand ce fut bien plus tard, en 1956, que Léon Brillouin (ce sujet avait décidément fort à voir avec le pays de Descartes et de Carnot), formula sa réfutation du principe de Maxwell.

Vernadsky se serait donc rapproché progressivement du sujet le plus brûlant, dans l'entourage des scientifiques français potentiellement les plus concernés, à un moment de l'histoire des sciences où il fait peu de doute que ce sujet innervait fortement, ne serait-ce que sous le manteau, la réflexion de la communauté scientifique.

Il en témoigne lors de l'écriture de *La Géochimie*, dès avant 1924. Parlant dans cet ouvrage de l'humanité, qui produit des masses importantes de métaux libres qui n'existaient auparavant que sous forme oxydée, il dira (Grenier, 2000, p.9) : « **Tous ces produits ne se distinguent pas des minéraux. Ils changent le cours éternel des cycles géochimiques... Il est clair que ce n'est pas un fait accidentel, qu'ils étaient préformés par toute l'évolution paléontologique. C'est un fait naturel comme les autres et nous y voyons un nouveau phénomène où la matière vivante agit en contradiction apparente avec le principe de Carnot.** »

Ce qui nous autorise à supposer que c'est notamment du fait de cette question « sous jacente » qu'il se rapprocha de Marie Curie. Marie Curie fut en effet l'élève de Marcel Brillouin, le grand physicien, et s'intéressa plus tard, tout comme Léon Brillouin, fils de Marcel, aux contributions préparatoires à l'émergence de la « mécanique quantique » ; ils participèrent tous deux au cinquième Congrès Solvay, en 1927, qui marqua la naissance de cette discipline.

Et s'il cherchait lui aussi à rendre compte, à partir de ces approches qui partout se répandaient, à partir de la dissymétrie de Pasteur, etc., de ces comportements spécifiques de la matière vivante, il nous apparaît de plus en plus clairement que, quand il constatait son fonctionnement si « contradictoire » au principe entropique, il n'en tirait pas alors les mêmes conclusions que ses confrères.

Au regard de ses positions antérieures et de ses déclarations futures, beaucoup moins prudentes, c'est en effet lors de ce second séjour en France que Vernadsky dû formuler très consciencieusement une problématique qui avait « vocation » à poser notre fameuse exception, et que c'est notamment à cette fin qu'il prépara et structura l'ensemble de sa démonstration de *La Biosphère*.

Mais notre « démon » avait pu accomplir ces mêmes années dans la communauté scientifique beaucoup de ravages quant à un clivage vitalo-mécaniste toujours prêt à resurgir. On peut comprendre dès lors qu'avec sa « contradiction apparente », il soit alors resté très prudent, en une matière « extrêmement inflammable ».

Eut-il l'occasion d'en débattre avec ses confrères, avec Marie Curie, avec Léon Brillouin ? Compte tenu de la spécificité de ses apports, se positionnait-il alors, entre 1922 et 1926, aussi clairement avec eux, par rapport au débat vitalo-mécaniste, qu'il le fera en 1927 dans *La Biosphère* ?, ne serait-ce que par rapport à la mécanique quantique émergente, qui représentait alors, notamment pour Brillouin, la réponse **mécaniste** à sa résolution ?

Eut-il même l'intention, plus implicite ou plus explicite, de présenter en France, à l'Académie des sciences, une exception du Principe de Carnot ?

A ces questions nous n'avons pas de réponse, mais l'ensemble du contexte dégagé nous montre que ses intentions, toutes implicites ou explicites qu'elles aient été, ont pu avoir alors quelque rapport avec le refus de sa demande de laboratoire.

Refus qui dans tous les cas l'obligera à retourner dans une Russie profondément transformée, devenue entretemps, depuis son départ pour l'Ukraine en 1917³⁷, puis pour la France en 1922, ... l'URSS !

Cet échec représenta une perte immense pour la science occidentale, pour l'écologie globale, pour l'épistémè moderne, et pour la France. Au seul niveau de notre controverse, qui veille toujours sous la cendre, serait-elle ramenée aux seules fractures entre la physique et la biologie³⁸, il nous apparaît aujourd'hui que Vernadsky, qui en avait parfaitement cerné les contours, aurait apporté « beaucoup » dans le sens de son dépassement et de sa résolution.

3.3.3 Vernadsky et Tolstoï : compléments biographiques de novembre 2011

Alors que nous écrivions les pages précédentes, en août 2011, nous n'avions pas reçu la seule biographie complète de Vernadsky disponible en Occident (Bailes, 1990), commandée aux Etats Unis. Ce qui en novembre est aujourd'hui chose faite. Une première lecture rapide nous permet d'apporter des confirmations importantes de certaines de nos extrapolations concernant la pensée, les positions sociales et questionnements fondamentaux de Vernadsky, et tout particulièrement vis à vis de Tolstoï et de son contexte.

Fils de la haute noblesse terrienne (son père possédait un domaine de 600 hectares, qu'il lui lèguera, mais qui lui sera confisqué après 1917), et comme tel étudiant privilégié à St Pétersbourg, Vernadsky rencontra en 1882 les frères Oldenbourg, lors d'une grande manifestation étudiante qui tourna à la révolte et qui eut pour l'époque un caractère très similaire au « 68 » français (et qui a pu s'inspirer de la Commune).

Eux aussi fils d'aristocrates, les deux frères venaient de fonder, dans le cadre de l'Université, le « cercle Oldenbourg », qui fut la traduction directe, au sein du mouvement étudiant, de la crise de remise en cause profonde que traversa Tolstoï à partir des années 1877, qu'il manifestera 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 III³⁹, un rôle très important dans les fondements d'une vision « communaliste », pacifiste et non violente de la révolution russe.

³⁷ Après avoir brièvement participé au premier gouvernement provisoire de 1917, il fut ensuite recherché par le gouvernement bolcheviques qui lui succéda et se serait réfugié en Ukraine pour cette raison (Grenier, 2000).

³⁸ Tel que nous le rappellent deux biologistes du CNRS (Bailly & Longo, 2008).

³⁹ Le chef déclaré de cette tentative d'assassinat était le frère de Lénine, Alexandre Oulianov, qui fut exécuté.

Pacifisme et non violence qu'ils héritèrent de Tolstoï, qui fut aussi en la matière le Professeur de Gandhi.

A l'exemple de Tolstoï, les frères Oldenbourg, Vernadsky et leurs amis du cercle, bientôt très nombreux, étudièrent les œuvres d'Alexandre Ivanovitch Herzen (1812-1870), ami de Proudhon⁴⁰, puis de Proudhon lui-même 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.

Ils vont ainsi promouvoir dans le monde étudiant russe de l'époque, composé en majeure partie de jeunes aristocrates, une forme d'ascétisme social et libertaire 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.

Et Vernadsky, ayant pris dans le cercle avec les frères Oldenbourg un rôle prépondérant, apparaîtra bientôt comme une des personnes les plus proches de Tolstoï. Après qu'il soit devenu, en 1886, Président du « Conseil uni des organisations étudiantes de Russie », il rencontrera Tolstoï à de nombreuses reprises pour avoir avec lui des discussions longues et approfondies concernant l'orientation de la jeunesse russe en même temps que la sienne propre.

En 1893, il a alors 30 ans et Tolstoï 65, il notera sur son journal (Bailes, 1990, p. 83) : *« 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. »*

C'est ainsi que, selon Bailes (1990, p. 83) : *« 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 ».*

Toutes raisons qui l'attachèrent un temps à la France, mais un temps seulement, ... tout comme Tolstoï !

3.3.4 Quand Vernadsky dit le fond de sa pensée

Que devint Vernadsky dans une Russie devenue URSS ? Il ne devra bientôt qu'à son immense notoriété de ne pas être envoyé au Goulag ou plus simplement passé par les armes.

Comme le dit Grenier (2000) : *« Aux pires moments des grandes purges stalinienne, 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 famine⁴¹. 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. »*

Et Bailes nous confirme qu'il fut en URSS une des très rares personnes, tout au long de la montée du stalinisme, à oser clamer publiquement sa réprobation du régime. Comme le lui avait enseigné Tolstoï, Vernadsky resta ainsi fidèle à la tâche de vérité qu'il s'était imposée. Quant au plan scientifique, c'est après seulement qu'il eut publié *La Biosphère*, qu'il commença vraiment à dire le fond de sa pensée.

⁴⁰ Père du socialisme russe et, dit-on, de l'émancipation des serfs, il s'exilera à Paris en 1847 et deviendra collaborateur de Proudhon.

⁴¹ Il rendra le régime responsable de la tragédie abominable des « cinq épis » et de la famine qui lui succéda, considérant là que l'URSS avait échoué ... (Vernadsky, 1945,...).

4. La « contradiction » de Vernadsky

Vernadsky n'avait-il pas dit en 1927 : « *Les représentations vitalistes donnent aux phénomènes vitaux des explications étrangères au monde des modèles sous la forme desquels nous élevons par généralisation scientifique l'édifice du Cosmos.* »

C'est pourquoi, quand Lovelock cherchera 50 ans plus tard à hisser au niveau d'une « généralisation vitaliste » qu'il nommera Gaïa, des hypothèses qui n'étaient pour Vernadsky qu'une évidence découlant de son immense travail, Vernadsky pour sa part, conforme à ses principes personnels, ne cherchera qu'à hisser les principes fondamentaux de *La Biosphère* au niveau d'une ultime « généralisation empirique » visant à établir une contradiction explicite à la loi « universelle » de l'entropie.

Les deux principes de la biogéochimie, qui forment le point culminant des travaux de Vernadsky et introduisent cette contradiction, ne sont pourtant nulle part mis en exergue, pour ce que nous avons pu en lire, dans la littérature traitant de sa vie ou de ses travaux.

Ils fondent l'existence de la biogéochimie. Ils expriment en condensé le principe général d'une relation dynamique de « co-évolution » tout à fait particulière des organismes vivants avec le milieu physique de leur existence, la Biosphère.

Ils visent à fonder l'existence de la « matière vivante » au regard des sciences physiques et de la thermodynamique.

Et plus loin, ils ont d'évidence la vocation plus particulière de « poser une contradiction » au principe de Carnot (nous ne parlerons donc plus d'exception).

Mais cette contradiction ne fut pas de suite explicite. Après l'avoir eu très probablement en projet, comme nous l'avons souligné, dès l'écriture de *La Biosphère* lors de son second séjour en France, Vernadsky, rentré en URSS, la précisera, pour ce que nous en connaissons, en deux étapes successives.

Il l'exprimera une première fois, mais de manière encore très indirecte et peu intelligible, à travers la première formulation de ses deux principes, dans une communication faite le 5 février 1928 à la Société des naturalistes de Leningrad, sur *L'évolution des espèces et la matière vivante*. On en trouve le texte en appendice de *La Biosphère* dès sa première publication française de 1929.

Dans la présentation qui va suivre, nous avons isolé cette première formulation de l'ensemble du texte qui l'accompagne afin de bien mettre en relief les deux principes.

Puis il la dira de manière bien plus explicite, juste après une seconde formulation des deux principes, lors d'une communication faite en 1930 aux sociétés des naturalistes de Moscou et de Leningrad, sur *L'étude de la vie et la nouvelle physique* (Vernadsky, 1930).

Tout en isolant aussi cette seconde formulation, pour une meilleure lisibilité et une meilleure comparabilité, nous avons cependant gardé une partie du texte qui l'accompagne. Parce qu'il contient ses préalables, et parce que surtout la contradiction de Vernadsky est « formulée » puis « exprimée » directement à la suite de cette seconde formulation.

Nous avons de même isolé les deux parties constitutives de cette contradiction.

Après quoi nous examinerons les raisons de l'évolution que l'on constate dans les deux formulations successives des deux principes, ainsi que les raisons de l'existence de deux principes distincts plutôt qu'un seul.

Nous examinerons notamment en quoi la contradiction est « centrée » sur le premier principe.

Raison pour laquelle, quoique nous aborderons certains aspects du second principe à travers la structure sémantique des espaces de la Biosphère, nous ne l'étudierons pas en détail dans le présent cahier.

Son étude approfondie devrait faire en effet l'objet de notre second cahier de recherche.

Nous entrerons par contre, dans la suite de ce travail, dans une étude détaillée du premier principe de la biogéochimie, qui aura pour objectif d'interpréter, tant que faire se pourra, le caractère « thermodynamique » particulier, spécifique à la Biosphère, à partir duquel ce premier principe de Vernadsky se trouve « fondé » à constituer à lui seul une contradiction fondamentale du principe de Carnot à l'échelle de la Terre.

Comme nous l'avons déjà exprimé, cette étude sera pour nous l'occasion de clarifier en parallèle nombre des particularités structurelles de la Biosphère, sans lesquelles nous ne saurions interpréter justement, à notre sens, cette contradiction de Carnot.

4.1 Les « deux » principes de la biogéochimie

4.1.1 Première formulation

Premier principe biogéochimique (formulation 1)

Vernadsky (1929, p. 264) : « *La migration biogène des éléments chimiques dans la biosphère tend à sa manifestation la plus complète.* »

Second principe biogéochimique (formulation 1)

Vernadsky (1929, p. 269) : « *L'évolution des espèces en aboutissant à la création des nouvelles formes vitales stables, doit se mouvoir dans le sens de l'accroissement de la migration biogène des atomes dans la biosphère.* »

4.1.2 Préalables à la seconde formulation

4.1.2.1 Contexte : une nouvelle épistémè

Vernadsky formule une seconde fois ces deux principes au cours de sa communication de 1930 sur *L'étude de la vie et la nouvelle physique*.

Cette conférence s'inscrivait dans un contexte scientifique, qui faisait suite à celui de son second séjour à Paris, où s'exprimait alors le besoin, la nécessité et l'immanence d'une « nouvelle » physique, qui, selon Vernadsky, devait bouleverser tous les « principes » qui avaient jusqu'alors guidé la science.

Vernadsky (1930, p. 1) : « *La révolution, qui dans notre XXème siècle s'opère dans la physique, soulève devant la pensée scientifique la nécessité d'une nouvelle révision des représentations biologiques fondamentales. Il paraît que c'est pour la première fois qu'il devient possible d'élever, dans le cosmos construit par la science, les phénomènes de la vie à un rang important. C'est pour la première fois au cours de trois siècles que s'entrouvre la possibilité de vaincre les profondes contradictions créées par la marche historique de la pensée, existant entre le cosmos scientifiquement construit et la vie de l'humanité ; entre la conception du monde ambiant lié avec la conscience de l'homme et son expression scientifique. Cette contradiction pénètre notre vie intellectuelle depuis le XVIème siècle; nous la sentons profondément à chaque pas. Ses conséquences sont innombrables.* »

Les « propriétés planétaires de la vie », puis « certaines de ses manifestations », que nous allons présenter, et à la suite desquelles seront formulés pour la deuxième fois les deux principes, puis leur contradiction de Carnot (seule et unique fois), vont nous donner le noyau de cette révision des représentations biologiques fondamentales auxquelles Vernadsky se référait alors, dans le contexte plus large d'une nouvelle relation de l'humanité avec la planète.

Elles nous autoriseront à penser que, suite notamment aux déceptions de son séjour occidental⁴², Vernadsky exprimait par cette conférence son intention d'orienter la science soviétique, alors en pleine expansion après la révolution de 1917 (Bailes, 1990), sur une nouvelle relation de celle-ci par rapport au vivant. Ceci au regard de principes de

⁴² Bailes (1990) nous donne le détail des autres demandes de création de laboratoire, aux américains notamment, que Vernadsky a faites durant son séjour parisien. Elles lui furent toutes refusées.

fonctionnement de la matière vivante qui formaient, selon Vernadsky, une contradiction flagrante aux grands principes de la physique jusqu'alors énoncés.

Et contradiction qu'il s'autorisait désormais à exprimer.

Mais cette conférence s'inscrivait fort malheureusement dans un autre contexte, beaucoup plus immédiat et dramatique, qui verra bientôt les (aspirations, illusions, besoins de vérité, ... ?) de Vernadsky s'effondrer totalement⁴³.

4.1.2.2 Propriétés planétaires de la vie

Vernadsky (1930, pp. 11-12) : « Parmi les propriétés planétaires de la vie sont à noter :

1. La matière vivante est créée et maintenue sur notre planète par l'énergie cosmique du Soleil. Elle y forme une partie intégrante de la géosphère supérieure, la biosphère, une partie indissoluble de son mécanisme.
2. L'énergie du Soleil est graduellement transportée par l'intermédiaire de la matière vivante dans les parties plus profondes de la planète, de son écorce.
3. La quantité de matière dans la biosphère pénétrée par la vie est une grandeur constante ou presque permanente à travers les temps géologiques.
4. La matière vivante entre dans le cours de tous les temps géologiques de façon uniforme dans les cycles géochimiques des éléments chimiques, dans l'écorce terrestre, en y jouant un rôle très important. Par cette voie, la matière vivante apporte dans la migration des éléments chimiques terrestres une énergie géochimique déterminée, dont la source première émane principalement du Soleil.
5. La matière vivante se trouve en un échange chimique continu avec le milieu cosmique qui l'entoure, mais n'y est jamais spontanément engendrée. Cette matière vivante représente dans le cours de tous les temps géologiques un bloc unique, génétiquement lié, nettement séparé du milieu cosmique.

4.1.3 Seconde formulation

Elle fait directement suite aux 5 propriétés précédentes, les deux principes représentant les propriétés n° 6 et 7.

Premier principe biogéochimique (formulation 2)

Vernadsky (1930, p. 12) : « L'énergie géochimique biogène tend à sa manifestation maximum dans la biosphère. »

Second principe biogéochimique (formulation 2)

Vernadsky (1930, p. 12) : « Lors de l'évolution des espèces, ce sont les organismes augmentant par leur vie l'énergie géochimique biogène qui survivent. »

4.2 Contradiction du principe de Carnot

4.2.1 Formulation

C'est comme propriété n°8, à la suite immédiate des n°6 et 7, et sous la forme apparente d'une synthèse de ces deux principes, que Vernadsky « formule » sa contradiction au principe de Carnot tel que le repris Clausius (*L'entropie de l'Univers tend vers un maximum*).

Formulation complémentaire aux deux principes de Vernadsky (formulation 1)

Vernadsky (1930, p. 12) : « 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. »

⁴³ Bailes (1990) nous montre, sans l'exprimer, qu'il sera bientôt enfermé dans une contradiction insoutenable, dans laquelle le stalinisme et le nazisme le forcèrent malgré lui à s'enfoncer, entre son besoin d'expression partagée de la vérité scientifique, et son patriotisme russe. Ceci quoiqu'il gardera toujours sa liberté de parole.

4.2.2 Expression

Il « exprime » ensuite cette contradiction, directement à la suite des « propriétés » de la vie, alors qu'il aborde cette fois quelques unes de ses « manifestations » les plus profondes.

Nous avons gardé cette expression dans son contexte immédiat, qui forme avec elle un tout indissociable.

(Vernadsky, 1930, pp. 12-13) : « *Notons aujourd'hui quelques-unes des manifestations les plus profondes de la vie...*

1. *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.*
2. *Les organismes peuvent vivre dans le milieu des forces moléculaires, étranger aux lois de la gravitation, ainsi que dans le milieu que ces lois caractérisent. Leurs dimensions minimales atteignent 10^{-6} cm, ils pénètrent dans le domaine des molécules.*
3. *Plus l'organisme est petit, plus son énergie géochimique est intense, il crée d'autant plus vite de nouveaux organismes. La vitesse maximum de cette création (scission) a des limites déterminées. Je l'appellerai élément du temps biologique. Je reviendrai encore aujourd'hui à ce phénomène.*
4. *La vie de l'organisme est un processus irréversible qui finit tôt ou tard par la mort. **Toute la matière vivante qui pénètre la biosphère est somme toute un processus irréversible** dans les temps géologiques, dans la succession des générations nous ne voyons ni le commencement ni la fin de ce processus et il se peut qu'ils n'existent point.*
5. ***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.** Très peu d'autres phénomènes physiques se trouvent de front avec la vie sous ce point de vue dans le Cosmos ; tels par exemple les corps radioactifs. Mais la cause de ce phénomène dans la matière vivante en est nettement différente.*
6. *Le champ thermodynamique de l'organisme vivant possède, à l'opposé des propriétés du milieu cosmique, une dissymétrie nettement exprimée. Nous ne savons rien d'analogue pour les autres corps naturels sur la Terre. La dissymétrie y est exprimée comme par le caractère particulier de la symétrie de l'espace, occupé par la matière vivante, existence des vecteurs polaires, énantiomorphes, très nettement exprimés, mais surtout par l'inconformité prononcée qui distingue le caractère droit de celui de gauche du phénomène (Généralisation de Pasteur). »*

4.3 Commentaires généraux

4.3.1 Sur les deux principes

Il apparaît très clairement, entre la première et la seconde formulation, que « *la migration biogène des éléments chimiques* » a été remplacée dans les deux principes par « *l'énergie géochimique biogène* ». Nous allons bientôt étudier cette migration des éléments biogènes, qui constitue le fondement de ces grands cycles (eau, CO₂, carbone, énergie, ...) qui nous sont aujourd'hui si familiers, quoique Vernadsky en avait une vision beaucoup plus opérative que ce qu'en général nous avons pu en retenir.

Ce changement est dû selon nous à la raison suivante.

Comme nous l'avons vu, Vernadsky a orienté progressivement sa pensée sur la mathématisation des sciences et surtout la « thermodynamique ». Ce que Bailes (1990) nous a depuis confirmé. Notons par exemple la « manifestation » n°6, où il est question de « champ thermodynamique ». Nous apprendrons bientôt que la Biosphère est selon Vernadsky entièrement structurée par de tels champs, qui seuls permirent l'émergence du vivant, en même temps qu'ils furent formés par le vivant dans une boucle récursive croissante.

Dans un tel cadre, Vernadsky, ayant probablement décidé de prendre une position définitive sur l'entropie dans les mois précédents sa conférence de 1930, aura compris que ses deux principes, tels qu'exprimés deux ans auparavant, ne visaient, ni directement, ni explicitement, « l'œil du cyclone entropique », et n'établissaient aucune relation intelligible avec le principe de Carnot.

Ces cycles de migration biogènes ne représentent en effet que des processus « mécaniques », dont Vernadsky était par ailleurs tout à fait conscient.

Vernadsky (1929, p.263) : « *Tous ces déplacements des éléments, quelle qu'en soit la cause, répondent à divers systèmes d'équilibres 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.* »

Et il avait déjà compris, grâce aux principes de Gibbs, que ces processus sont « dissipateurs » d'énergie (et donc producteurs d'entropie), et qu'ils ne fonctionnent que grâce à un apport d'énergie libre (au delà du rayonnement solaire).

Vernadsky (1924, p. 8-9) : « *L'énergie libre des processus cycliques, une fois le cycle achevé, est égale à zéro, et pendant toute la durée du processus tend vers un minimum. Leurs différents stades présentent des équilibres stables. Un afflux d'énergie extérieure est nécessaire pour renouveler le processus.* »

Et que seuls les organismes photosynthétiques sont capables de produire cette énergie libre.

Vernadsky (1924, p. 8-9) : « *Les processus cycliques naturels – si nous laissons de côté les détails – tirent cette énergie extérieure tant de la surface de l'écorce terrestre, de la biosphère, que des régions métamorphiques et magmatiques. Dans le premier cas, les organismes verts à chlorophylle sont ces porteurs - des accumulateurs amassant et distribuant l'énergie radiante du soleil qu'ils transforment en énergie chimique, et les bactéries inférieures qui utilisent des minéraux vadoses riches en oxygène.* »

Il aurait donc pris conscience qu'il n'avait pas mis le doigt sur l'élément moteur de la grande machinerie des cycles thermodynamiques : l'énergie géochimique biogène.

Car cette dernière n'est effectivement rien d'autre que « l'énergie libre » stockée par le vivant, sauf à exprimer en un même terme son rapport avec la chimie, la géologie et la biologie, donc tout le sens de cette nouvelle science que Vernadsky a fondé.

Vernadsky nous le confirme on ne peut plus clairement avec la « manifestation » n°5 : « *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.* », qu'il nous suffit de comparer à la propriété n°8 : « *... mais l'énergie géochimique biogène apportée par la matière vivante dans le milieu cosmique s'accroît.* », pour établir une relation indubitable entre les deux termes.

Une énergie géochimique biogène que nous pouvons donc voir finalement comme le terme précurseur, la première formulation, d'un concept qui aura quelques décennies plus tard beaucoup plus de succès : la néguentropie.

Ce qui nous autorise à mettre à jour les deux principes de Vernadsky, ou si l'on préfère, à leur donner une formulation « moderne », qui prendrait la forme suivante :

Premier principe biogéochimique (formulation 3)

« *La néguentropie tend dans la Biosphère à sa manifestation maximale.* »

Second principe biogéochimique (formulation 3)

« *Lors de l'évolution des espèces, ce sont les organismes augmentant par leur vie la néguentropie qui survivent.* »

4.3.2 Sur la contradiction de Vernadsky

Nous n'avons aucun commentaire à formuler à ce stade, d'autant que nous allons l'étudier en détail. Nous lui donnerons simplement une formulation « moderne », à la suite des deux principes.

Formulation complémentaire aux deux principes de Vernadsky (formulation 2)

« Lors de l'évolution des espèces, la composition chimique de la matière vivante demeure constante, mais la néguentropie (apportée par la matière vivante) dans le milieu cosmique s'accroît. »

Nous avons donc finalement un ensemble de principes qui constitue, sauf à la rendre intelligible, une contradiction parfaitement explicite de cet autre principe selon lequel : *l'entropie de l'Univers tend vers un maximum.*

Ensemble que nous pourrions dès lors nommer sans réserve : *La contradiction de Vernadsky.*

4.3.3 Sur deux principes et non un seul

Nous verrons cependant que la contradiction de Vernadsky est « centrée » sur le premier principe, ce qui pose la question de l'existence de deux principes et non d'un seul.

Comparons les seuls textes des « propriétés » et des « manifestations » planétaires de la vie. Nous constatons que Vernadsky n'utilise dans le premier que le terme de « matière vivante », et dans le second celui d'« organisme vivant », à une exception près.

Cette formulation différenciée est une constante des travaux de Vernadsky.

Quoiqu'il nous sera parfois difficile, comme nous le verrons, de préciser complètement ce qu'il entend signifier quand il utilise ces termes de manière croisée, alternative ou mélangée, nous avons pu établir que quand il parle de « matière vivante », Vernadsky examine prioritairement une matière homogène, une forme de mousse vivante en expansion, dans son rapport avec la « matière inerte » de la Terre primitive. Ce qui lui permet notamment d'établir des comparaisons physiques et thermodynamiques entre les différents types de matière.

Il examine ainsi les premiers organismes, les « procaryotes », bactéries et archées rassemblées au sein de chaînes trophiques parfaitement homogènes (tapis bactériens), mais aux fonctions différenciées, dans le travail de transformation complète de la matière inerte qu'elles exécutèrent pendant 3 milliards d'années sur la surface originelle de la planète.

Ceci notamment grâce à leur capacité très particulière de division cellulaire (mitose) et de croissance exponentielle.

Au point de transformer cette matière inerte en une matière « biogène » qui formera la matière spécifique de la « Biosphère », une sphère, ou plus exactement un « champ thermodynamique » qui n'existait absolument pas à l'origine, et qui de ce fait aura une genèse.

Et ce n'est seulement qu'après que cette matière biogène, à l'exemple notable de l'oxygène, ait totalement « rempli et gonflé » (au sens propre) la Biosphère, que les premiers organismes « autonomes », les « eucaryotes », apparaîtront et entameront l'évolution des espèces telle que Darwin nous l'a contée.

Et ces organismes vivront et établiront leur habitat dans un champ thermodynamique nouveau, parfaitement différencié de la Biosphère, mais « au sein » de la Biosphère : le monde du « biologique », constitué d'organismes vivants ou morts. Champ à ce point différent de celui de la Biosphère, qu'il justifiera que nous utilisions un autre terme : l'Ecosphère.

Quand Vernadsky nous parle d'organismes vivants, il se réfère donc plus spécifiquement à l'autonomie fonctionnelle des eucaryotes et à l'évolution des espèces.

Et en différenciant ainsi matière et organismes vivants, il voulait donc séparer deux fonctions « spatio-temporelles » du vivant « et » de la Biosphère complètement différentes : la transformation « biogène » de la matière strictement « géologique » des origines d'une part, la production de la matière « biologique » à travers l'évolution des espèces qui suivra, d'autre part.

Ce qui justifiait effectivement « deux » principes.

Le premier est celui qui établit la relation croissante entre la matière vivante et la nature « géologique » de la planète originelle. Le second est celui qui établit la relation évolutive entre les organismes vivants et la nature « biologique » de la planète.

Dès lors,

Le premier principe est celui qui fonde l'existence d'un principe de « croissance » de l'énergie géochimique biogène, qui constitue dès l'origine la caractéristique principale de la matière vivante.

C'est un principe de « croissance » négumentropique.

Il est celui qui, « fabriquant » la Biosphère, nous explique, enfin, l'énigme de Bonsack : l'apparition des stocks négumentropiques à la surface de la Terre.

Il est le principe qui constitue l'aspect central, nous pourrions dire la « matière », de la « contradiction de Vernadsky ».

Le second principe, dans une continuité cumulative à la production négumentropique de la Biosphère, est celui qui fonde une nouvelle propriété émergente de la négumentropie du vivant, spécifique à la différenciation des espèces dans l'arbre de l'évolution : la complexité.

C'est un principe de « différenciation » négumentropique, autrement dit de « biodiversification ».

4.3.4 Croissance et complexité

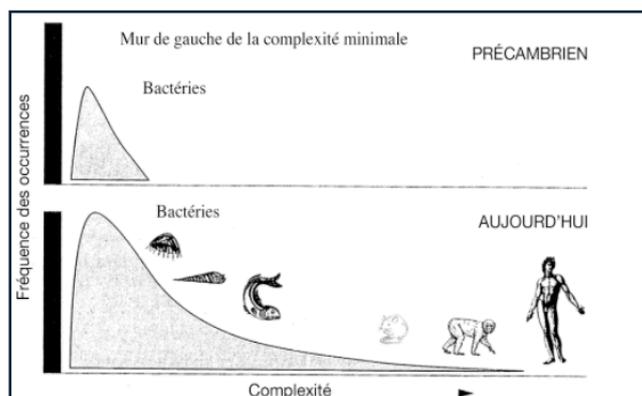
Et ces deux principes, qui dans l'évolution se suivirent, mais par strates cumulatives, sont aujourd'hui associés dans chaque être vivant.

Ils sont aujourd'hui mis en exergue par certains biologistes étudiant la morphogénèse. Bailly & Longo (2008) proposent ainsi de compléter le concept de « l'entropie à signe négatif » (symbole S⁻), qui caractérise la « croissance » des organismes vivants (division et prolifération cellulaire, mesurable par la densité de biomasse), par un autre concept, la « complexité » (symbole K), qui aurait vocation à « prendre le relais » de l'entropie négative à un certain moment de l'évolution des organismes.

La complexité serait susceptible de refléter le processus de « différenciation » cellulaire et de spécialisation fonctionnelle de plus en plus diversifiée des organismes vivants depuis l'« endosymbiose » (Margulis, 1986) et l'apparition des premiers eucaryotes.

Au delà de la croissance spécifique aux procaryotes, dont la biomasse ne cesse de croître que quand elle trouve un obstacle ou que sa matière première est épuisée, il y a en effet chez les eucaryotes un moment de leur évolution où leur complexité dite « épistémique » (Bailly et Longo, 2008, p. 14) continuerait à se développer quand la seule entropie négative s'arrêterait de croître, voire se mettrait à décroître (vieillesse). Il y aurait ici un « mur » de la complexité.

Figure 7 : Le mur de la complexité



Source : Bailly & Longo (2008)

5. Etude du premier principe biogéochimique

5.1 Introduction

Conformément à notre objectif de travail, la suite de ce cahier sera consacrée à l'étude approfondie du premier principe, fondement de la contradiction de Vernadsky, qui devient le préalable désormais incontournable à notre question première de la biodiversité, qui fera pour sa part l'objet de notre cahier n°2.

Nous introduirons cette étude par un petit commentaire.

Vernadsky utilise une terminologie qu'il veut la plus précise possible, pour aider à caractériser, au sein de la science « biogéochimique » qu'il a développée, certains concepts sémantiques qui furent mal ou pas du tout définis par le passé, du fait notamment des cloisonnements entre disciplines, comme la géologie et la biologie, qui ont des terminologies différenciées. Il va ainsi définir, dans un objectif évident d'unification des sciences, des notions nouvelles ou anciennement connues qui établissent des « ponts » permettant de passer de la chimie et des sciences de la Terre au sens strict, aux sciences biologiques touchant au vivant.

Ce qui suppose de caractériser différentes strates « progressives » de concepts, permettant par exemple de passer de la matière complètement « inerte » de la croûte terrestre originelle, à la matière « vadose »⁴⁴ ou « bio-inerte » de la Biosphère, pour aborder au final la matière « vivante ». Matière vivante qui va connaître un ensemble de subdivisions, dont la toute première, entre la matière vivante de premier ordre, qui caractérise, selon Vernadsky et « en première approche » les organismes autotrophes, et la matière vivante de second ordre (les organismes vivants), qui caractérise selon Vernadsky, et toujours en première approche, les hétérotrophes. Nous serons amenés à faire des clarifications importantes sur ce sujet, qui ne pouvaient être réalisées en 1930.

Le problème pour nous est d'abord que beaucoup de ces notions sont très inhabituelles, mais il s'aggrave ensuite deux fois :

- La première quand Vernadsky, qui se comprend parfaitement lui même, utilise des termes différents (et de plus, évolutifs) pour caractériser ce que nous pourrions nous même, aujourd'hui, nous représenter au sein d'un « même espace théorique ». Il va par exemple utiliser des termes différents pour une même enveloppe terrestre, selon qu'il regarde son caractère thermodynamique (volume, pression, température), les états de la matière qu'on y trouve (du gazeux au solide en passant par le liquide), la composition chimique de cette enveloppe, ou encore ses aspects paragenétiques (modes de gisement caractéristiques des éléments chimiques dans cette enveloppe).
- La seconde quand, opérant de multiples découpages, il se heurte à des trous de connaissance qui ne pouvaient être élucidés de son temps. Nous verrons qu'à ces moments là il « anticipe » sur ce que la science découvrira plus tard, mais en donnant des noms qui, pour peu que nous ne soyons pas géologiste, ou biologiste, ou chimiste (ou tout à la fois) nous provoquent des confusions mentales qui nous perdent parfois des jours entiers dans un dédale sans fil d'Ariane.

Malheureusement, la « théorie générale des systèmes » n'existait pas du temps de Vernadsky. Elle ne connaîtra ses débuts que vingt ans après ses conférences de 1928-1930. S'il avait pu la connaître de son temps il n'aurait probablement pas manqué de formuler ses deux principes (et l'ensemble des fonctions biogéochimiques auxquels ils font appel) en un principe systémique, unique et général, concernant les systèmes vivants⁴⁵, leurs sous-systèmes, et leur structuration hiérarchique au sein de la Biosphère. Cette dernière étant entendue comme « domaine » du vivant, milieu global de leur expansion duquel les systèmes vivants tireront leurs conditions

⁴⁴ Nous expliquerons bientôt de quoi il s'agit. Sachons simplement à ce stade que ce sont des composés chimiques originellement inertes transformés par le vivant.

⁴⁵ Comme on n'a pas manqué de le faire plus tard avec les « écosystèmes ».

vitales d'existence, puis comme « maison » du vivant, qui intègre comme telle la hiérarchie spatio-temporelle des organismes vivants à l'intérieur des espèces et entre les espèces.

Si donc nous pouvons espérer apporter une contribution, ce sera en clarifiant plus encore, comme nous avons déjà commencé à le faire, les concepts et notions de Vernadsky, en nous aidant d'outils et schémas descriptifs, de nature systémique si possible.

Puis en les rapprochant autant que faire se pourra, comme il avait commencé à le faire lui-même, des concepts de la thermodynamique (mais aussi de la physique moderne, de la biologie, etc.). L'idée étant de pouvoir synthétiser l'ensemble de ses démonstrations dans un cadre théorique général, repris à la fois à la théorie des systèmes et à la thermodynamique, qui en permettra une meilleure accessibilité en même temps qu'il nous permettra de conclure, tant que faire se pourra, notre démonstration de la contradiction de Vernadsky.

Conclusion qui passe par l'étude et l'explicitation particulière du premier principe de la biogéochimie, qui y fait explicitement référence.

Car nous découvrirons que le premier et le second principe sont en relation avec deux strates fondamentales du vivant qui n'apparaissent pas comme tel à une première lecture des travaux de Vernadsky, notamment du fait de la terminologie qu'il utilise, et de définitions alors très complexes à exprimer en fonction de la connaissance scientifique de l'époque.

Serons-nous plus clair si nous exprimons que toute la difficulté du concept de Biosphère réside en ce qu'il nous décrit, par sa propre évolution spatio-temporelle, la transition difficile des domaines géologiques et chimiques du monde de l'inerte (entropique !) vers le domaine biologique du monde vivant ?

Autrement dit comment la Biosphère a vocation à « traverser » le mur de la complexité.

Raison pour laquelle physiciens et biologistes se seront approprié le concept, mais chacun de son côté en restreignant sa définition à son domaine, et en aidant de ce fait à produire ces confusions que nous avons étudiées et de nouvelles que nous allons découvrir.

Alors que pourtant Vernadsky, avec la « biogéochimie », insistait tant sur l'impérieuse nécessité de l'intégration de ces domaines, en laquelle réside la clef du passage entre un environnement regardé et vu comme inerte par nos modèles et outils quantitatifs (quoique les choses soient en train de changer), et la qualité/diversité biologique !

La bonne compréhension des deux principes de la biogéochimie est entièrement corrélée à la bonne compréhension des principes généraux de la Biosphère, tels que Vernadsky a voulu nous les exposer. Mais quand nous avons déjà pu constater les confusions qu'il y a eu à ce sujet dans le passé, nous en découvrirons malheureusement de nouvelles, toutes aussi fondamentales, aux abords du second principe.

En même temps que nous allons continuer à clarifier ces confusions, nous allons maintenant entrer dans une étude et une explicitation des fonctions génériques de la Biosphère qui, dans la logique du premier principe de Vernadsky, nous permettront d'en préciser les aspects les plus importants, tels que l'expansion historique de la Biosphère, la stabilité climatique, la matière biogène et les « cycles biogéochimiques » (ou migration biogène des éléments chimiques).

Les nouvelles découvertes de la biologie, de l'astrophysique, de l'exobiologie, de la formation du climat, ..., sont en effet ces dernières années si importantes qu'elles nous permettent une « mise à jour » substantielle des principes généraux de la Biosphère.

Cette étude passera tout d'abord par une description mieux stabilisée de la Biosphère (selon Vernadsky), après quoi nous approfondirons le concept en entrant dans des découpages et des définitions nouvelles qui établiront progressivement un pont vers la notion d'écosystème et de biodiversité que nous étudierons avec le second principe dans notre cahier n°2.

Nous finirons enfin cette étude du premier principe par une interprétation thermodynamique dont l'objet sera de nous montrer en quoi la fonction de « croissance néguentropique » qu'il met en exergue constitue une contradiction du principe de Carnot.

5.2 De l'éternité ... aux âges géologiques

Vernadsky exprimait dans ses premiers écrits une forme d'immuabilité spatio-temporelle de la Biosphère sur des temps s'étendant sur plusieurs milliards d'années.

Vernadsky (1929, p.74) : « *La vie englobe une partie considérable des atomes qui forment la matière de la surface terrestre. Sous son influence, ces atomes se trouvent en un mouvement perpétuel et intense... Or ce processus subsiste depuis des milliards d'années, depuis l'ère archéozoïque la plus ancienne jusqu'à nos jours, et demeure inaltérable dans ses traits essentiels.* »

Durées géologiques tellement longues qu'il en viendra souvent à confondre la durée d'existence de la Biosphère avec l'éternité.

Vernadsky (1930, p. 8) : « *Les fonctions vitales de la biosphère, les fonctions biogéochimiques, sont immuables à travers les temps géologiques. Nulle d'entre elles n'a fait apparition dans le cours de ces temps. Elles ont toutes existé simultanément et toujours. Elles sont géologiquement éternelles.* »

Cette forme de fusion entre milliards d'années et éternité se comprend très bien, car la vision des origines temporelles de la vie des naturalistes traditionnels, suivant d'abord celle de l'Eglise puis s'en différenciant progressivement, s'échelonnait sur les deux siècles passés entre 6000 ans (Linné, vers 1740), 74000 ans (Buffon, après 1740) et 25.000.000 d'années. Cette dernière période restant stable depuis Lord Kelvin (1895) jusqu'à la fin de la seconde guerre mondiale (Guyénot, toujours quelques millions en 1944).

C'est dans un tel contexte que Vernadsky, qui pensait sur des périodes tellement plus grandes, ne pouvait ou ne voulait concevoir, jusqu'en 1930, une origine temporelle de la Biosphère.

Mais il admettra bientôt, entre la fin de 1930 et 1931, une origine à cette forme d'immuabilité, et donc que la vie et la Biosphère aient pu avoir un commencement et une genèse.

Vernadsky (1931, pp.1-2) : « *Des conditions ont pu exister dans l'histoire terrestre où il n'y avait pas de biosphère, et des phénomènes ou des états physico-chimiques ont existé dans l'écorce terrestre absents aujourd'hui, qui furent nécessaires pour la manifestation de l'abiogenèse. Il est possible, aussi qu'il y ait des phénomènes physico-chimiques inconnus de nous, non pris en considération par le principe de Redi, permettant l'abiogenèse, qui existerait même aujourd'hui sur la Terre, mais échapperait à notre attention par suite de l'insuffisance et du manque de précision de nos méthodes scientifiques actuelles...*

...La plus grande partie de l'ère archéenne avait été pénétrée par la vie, analogue à celle d'aujourd'hui dans ses traits essentiels, génétiquement liée avec elle. La biosphère a existé à travers tous ces temps de manière immuable. Ce ne sont pas seulement les restes de la vie qui le prouvent, mais l'immuabilité au cours de tous ces temps de processus de l'altération superficielle de l'écorce terrestre, le caractère et la paragenèse des minéraux qui constituent la biosphère et qui dans leur genèse sont de la manière la plus étroite liés avec la vie. »

Il nous expliquera même dans la note n°26 de ce même article de 1931 ce qu'il voulait entendre (ce qui ressemble à une forme de justification⁴⁶) en utilisant les concepts d'éternité géologique ou d'immuabilité : « *Il me semble très commode de distinguer de tels phénomènes géologiques comme des phénomènes éternels « dans les temps géologiques ». De tels phénomènes se distinguent nettement des phénomènes changeants de l'histoire géologique, de l'évolution géologique du Globe et font partie de son mécanisme immuable ou presque immuable au cours des temps géologiques.* »

Outre son retour en URSS, nouvelle patrie du matérialisme, cette « précision » de l'opinion de Vernadsky pourrait être liée à la découverte, en 1931, par Harold Clayton (1893-1981), du deutérium et de l'oxyde de deutérium (D₂O) ou eau lourde (D₂O = ²H₂O). Cette découverte fut fondamentale car les noyaux de deutérium n'ont pu être formés que lors d'une synthèse primordiale de l'Univers. Ce qui aura pour effet de mettre en cause la théorie de l'état stationnaire d'un Univers éternel et immuable, et d'arguer en faveur d'une théorie du Big Bang qui s'affirmera (contre la première) tout au long de la seconde partie du XXe siècle.

⁴⁶ Vernadsky était en 1931 rentré en URSS, et tout concept d'éternité devenait alors pour le moins fort mal vu. Il devra même plus tard se défendre devant le parti communiste d'une accusation de néo-vitalisme.

Vernadsky aura ainsi évolué avec son temps,... en URSS, et on constatera qu'en 1938 ses réserves sur une origine temporelle de la Biosphère avaient entièrement disparues au profit d'une affirmation de son expansion progressive dans les temps longs géologiques.

Vernadsky (1938, p. 34) : « La taille de la surface occupée, et les régions dans lesquelles les corps naturels apparaissent dans la biosphère, sont limités par la dimension de cette dernière, et ne peuvent se développer qu'avec l'expansion de la biosphère. Evidemment, la biosphère s'épand au cours des temps géologiques, à travers le mouvement de la matière vivante. Dans ce processus, les corps naturels inertes de la biosphère jouent un rôle passif...

... Evidemment, la masse de la matière vivante se développe au cours des temps géologiques, et le processus d'occupation de la croûte terrestre par la matière vivante n'a pas encore été complété. »

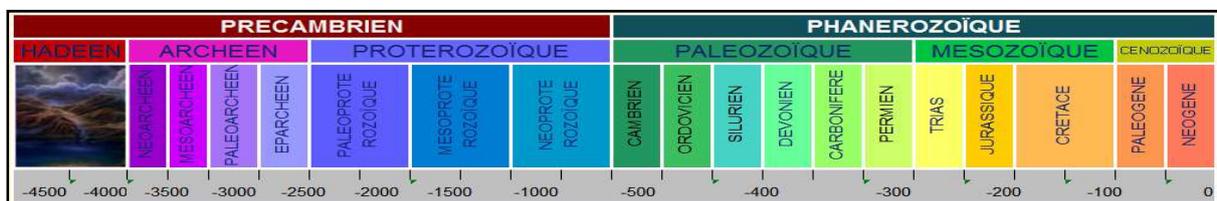
Toutes choses qui supposent d'admettre avec Vernadsky, et avec le Big Bang, une expansion progressive de la Biosphère sur la surface originelle totalement inerte qui résulta de l'accrétion terrestre. Mais qui nous expliquent aussi que cette vision « instable » des idées de Vernadsky quant aux origines de la Biosphère sur les très longues périodes géologiques, aura probablement participé aux confusions encore actuelles à son propos.

Quand, avec lui, nous avons pu en effet la positionner un temps dans une forme d'éternité, une forme d'acquis originel indiscutable et invérifiable (toujours la question de Bonsack), nous avons pu dans le même temps reléguer ses fondements à l'arrière plan, tout comme l'arrière plan d'un paysage, dans lequel la seule évolution possible et observable devient celle des seuls organismes vivants nous faisant face au premier plan, tels des animaux dans une forêt.

La Biosphère observable devant nous devenant la seule Biosphère que nous puissions imaginer, nous avons pu alors en restreindre la définition à ces seuls organismes vivants dans leur habitat.

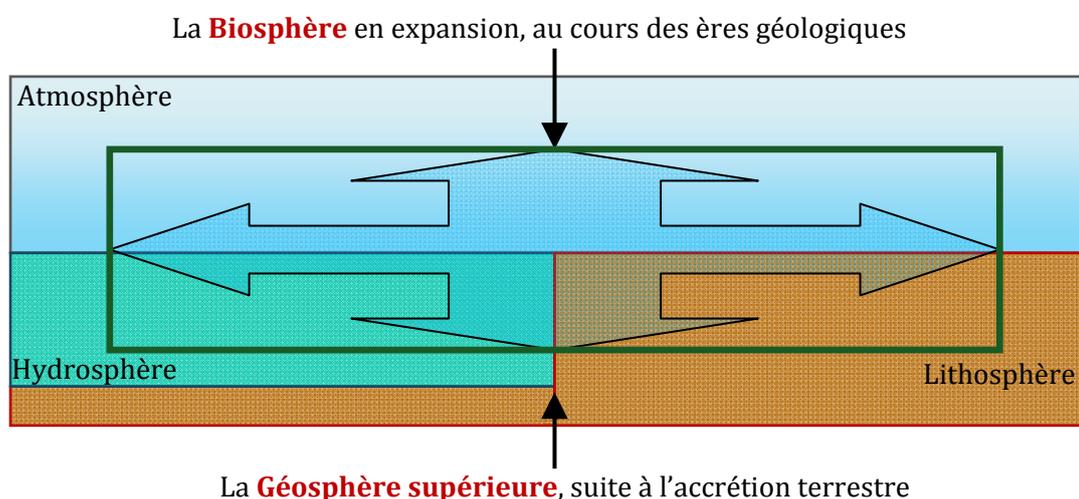
Cette question étant maintenant clarifiée introduit donc le principe d'une évolution temporelle de la Biosphère à partir de l'Archéen, tel qu'il est positionné dans l'échelle des périodes géologiques de la figure suivante.

Figure 8 : Echelle indicative des périodes géologiques (éons, ères, ...), en millions d'années



Elle nous permet par ailleurs de représenter la Biosphère en évolution au cours des ères géologiques :

Figure 9 : La Biosphère en expansion



5.3 Origines de la Biosphère, stabilité climatique, stabilité du concept

5.3.1 Changer de regard sur la Terre

Nous avons vu que la Terre pouvait être regardée comme un système fermé, quand bien même la Biosphère correspond aux définitions d'un système ouvert. Revenons sur ce sujet pour tenter de bien en clarifier les concepts.

A partir de la fin des années 50, période de lancement des premiers satellites, quand nous avons bénéficié des premières photographies de « la Terre vue de l'espace », celle-ci sera souvent comparée à un « vaisseau spatial » navigant dans le vide de l'espace cosmique, et dont l'humanité serait aux commandes.

Cette métaphore suppose que l'on observe la Terre d'un point de vue très éloigné comme une « sphère » flottant seule dans l'apesanteur d'un espace « géométrisé », tournant lentement sur elle-même dans le silence de la nuit éternelle, seule rattachée au repère mouvant d'un soleil dardant sur elle des rayons qui éclairent et réchauffent sa face.

[Figure 10 : La Terre, vaisseau spatial isolé dans l'espace cosmique](#)



Ainsi regardée, la Terre ne pouvait être qu'un système « fermé » et complètement isolé au sein d'un milieu duquel elle ne recevait rien d'autre que l'énergie solaire. Georgescu-Roegen (1979, p.68) : « ... bien que le vaisseau spatial de l'humanité flotte au milieu d'une fantastique réserve d'énergie utilisable, seule une partie infinitésimale de ce réservoir est potentiellement accessible à l'homme.. »

Mais en même temps cette distance permettait de se dégager des catégories spécialisées de l'analyse scientifique traditionnelle pour aborder en une même vue globale la complexité des relations fonctionnelles permettant à ce globe si fragile de bénéficier de cette propriété si rare dans l'espace infini des galaxies : la vie.

C'est ce second regard que nous propose Vernadsky dans la première partie de *La Biosphère*. Ce n'est déjà plus la Terre qu'il regarde, mais « La Biosphère dans le cosmos », où elle n'est plus ce vaisseau enfermé sur lui-même. La situant dans une globalité complexe, il nous la présente comme recevant de tous les points des espaces célestes un nombre infini de rayonnements divers, dont les rayonnements lumineux visibles ne forment qu'une part insignifiante. Et non seulement la Biosphère, mais tout l'espace pouvant être embrassé par la pensée et lui étant accessible, est rempli et pénétré par les rayons de ce milieu immatériel. Et l'alternance perpétuelle de ces rayonnements qui remplissent l'espace distingue nettement ce milieu cosmique de l'espace idéal de la géométrie.

Lovelock, que nous n'hésiterons pas à citer quand de besoin, quoi que nous ayons pu déduire de ses hypothèses et positions, reprendra lui-même cette idée, à propos de Gaïa.

Lovelock (1979, p.32) : « Il s'agit également d'une alternative (Gaïa) à la vision présentant notre planète sous les traits d'un vaisseau spatial fou, voyageant à jamais, privé de commandant de bord et d'objectivité, décrivant stupidement un cercle autour du soleil. »

Dans la deuxième partie de son ouvrage, Vernadsky, descendu sur terre, nous propose une plongée dans « le domaine de la vie ». Il passe de la Terre comme sphère regardée de très loin

dans l'espace cosmique à la Biosphère regardée de beaucoup plus près comme une enveloppe terrestre. La Biosphère devient alors un espace tampon, une frêle interface qui va opérer la synthèse entre les émanations énergiques et matérielles foncièrement différentes du noyau solaire et du noyau terrestre.

Figure 11 : La Biosphère comme enveloppe terrestre



Dans cette nouvelle vision, la Terre, devenue Biosphère, n'est plus victime de ce regard présocratique de l'homme sur la nature au sens large, qui, face à la parfaite « unicité » géométrique de l'espace cosmique, voyait en celle-ci l'expression du chaos. Se dégageant d'une position négligeable dans l'ordre « cosmique », elle devient le lieu rapproché dans lequel émerge en quelque sorte un « second » ordre : le vivant, qui contredit les lois « naturelles » (pour la physique classique) de la gravitation, de la « réversibilité » et de la thermodynamique de l'équilibre. La Terre, ainsi devenue Biosphère, deviendrait un système « ouvert ».

5.3.2 La Biosphère, système ouvert

Montant jusqu'aux parties actives de l'atmosphère (la troposphère et une partie de la stratosphère jusqu'à la couche d'ozone (environ 25 km)), et pouvant parfois descendre jusqu'aux grandes profondeurs de la lithosphère et aux abysses de l'hydrosphère (jusqu'à 12 km), la Biosphère aurait une épaisseur maximale de 40 km, à savoir un millième de la circonférence terrestre. Rapportée au diamètre de la terre (environ 12730 km), la Biosphère serait donc 314 fois moins épaisse, ce qui comparée à une pomme de 7 cm de diamètre, nous donnerait une épaisseur maximale de 2 dixièmes de millimètre. La Biosphère est donc bien une « peau » extrêmement fine, sur laquelle se « tisse » le vivant.

Mais regardons là en elle même, distinctement de la Terre. La Biosphère se présentera alors comme une enveloppe d'interface entre l'intérieur de la terre et l'espace cosmique.

Dans un tel cadre, il y a lieu de considérer :

Premièrement que ce système d'échange se présente en direction de l'espace comme une serre, dont la frontière (la paroi) supérieure est constituée par la couche d'ozone qui limite la pénétration de certains rayonnements néfastes pour la vie en provenance de l'espace cosmique (ultra violets notamment) et laisse pénétrer de multiples autres rayonnements cosmiques dont les rayons énergétiques solaires. Cette paroi laisse passer par ailleurs divers poussières et météorites dont la quantité au long des temps géologiques a pu être considérable.

Deuxièmement qu'il existe une distinction entre, d'une part, les astéroïdes « chondritiques », systèmes « fermés » au sens thermodynamique (Prigogine, 1968, p.1), qui, après leur accrétion (agglomération progressives des amas de chondres) ne reçoivent que des rayonnements cosmiques et évoluent vers l'équilibre thermodynamique (entropie maximale), et, d'autre part, les astéroïdes « achondrites », qui après l'accrétion originelle ont connu un processus de « différenciation » géochimique de leurs enveloppes thermodynamiques : atmosphère, croûte, manteau, noyau, ...

Vernadsky (élève de Mendéléïev) a ainsi montré qu'il existait, au delà des cycles bien connus de l'azote, du carbone, de l'eau, etc., un cycle complet pour au moins 28 éléments du tableau de Mendéléïev, et probablement pour dix éléments complémentaires (Vernadsky, 1924a). Il les nommera « cycles biogéochimiques ». Ils participent tous peu ou prou de cette « ouverture » de la Biosphère.

La Biosphère se présente donc comme un système d'échange, un volume à double paroi, l'une en direction de l'espace, l'autre en direction du centre de la Terre, et recevant de part et d'autre :

- De l'**énergie** : tous rayonnements cosmiques traversant la couche d'ozone que nous positionnerons symboliquement au nord (la biosphère reçoit aussi de l'énergie libre terrestre sous forme d'éléments radioactifs provenant du manteau mais nous négligerons ici cet aspect)
- De la **matière** : cycle des roches traversant la croûte terrestre que nous positionnerons symboliquement au sud (la Biosphère reçoit aussi comme nous l'avons entrevu de la matière provenant de l'espace, mais nous négligerons aussi cet aspect)

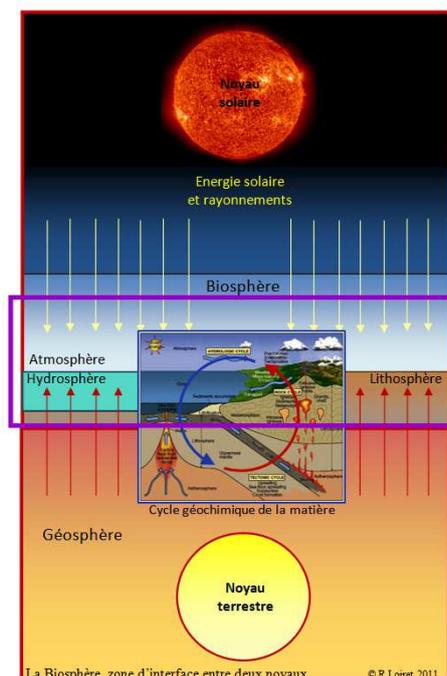
La Biosphère répond donc, en première approche, à toutes les définitions d'un système « ouvert » (Von Bertalanffy, 1968 ; Prigogine, 1968, p.1).

Mais nous précisons « première approche » car ce n'était pas forcément le cas de la Terre, aux origines de son accréation. Ce qui supposerait une évolution. Selon Prigogine (1968, chapitre 6), à la différence des systèmes « isolés », qui ne reçoivent ni énergie ni matière, les systèmes « fermés » (qui ne reçoivent que de l'énergie) et les systèmes « ouverts » (énergie et matière) sont dans une dynamique d'évolution vers un état stationnaire de non-équilibre. Il se pourrait donc qu'il y ait eu au cours des temps géologiques, dans le cadre de cette évolution, une évolution entre Terre fermée et Biosphère ouverte. Nous y reviendrons plus loin, lorsque nous examinerons avec une plus grande précision les états d'évolution passés de la Terre.

Prigogine (1968, p.93) considère même que deux systèmes ouverts en interrelation puissent être contenus dans un super ensemble qui serait lui même fermé, ce qui pourrait être le cas de la Biosphère et de la géosphère. Plusieurs représentations sont ainsi possibles en fonction des aspects que nous privilégions, sachant que dans tous les cas, la Biosphère reçoit en renvoi énergie et matière.

Nous pouvons donc, sous une forme « imagée », nous représenter ainsi la Biosphère, « vue » comme système ouvert, à l'interface de deux noyaux, sources d'énergie et de matière :

Figure 15 : Représentation (imagée) de la Biosphère, vue comme système ouvert



5.3.3 La Biosphère, champ de stabilité vitale

Vernadsky différencie les enveloppes terrestres à partir d'autant de paramètres thermodynamiques, chimiques ou d'états de la matière. Vernadsky (1929, p. 153) : « Dès lors, les grandes lignes de la structure chimique et physique de l'écorce terrestre, malgré l'extrême complexité de cette structure, se dessinent nettement ; elles permettent de saisir par voie empirique les états essentiels des phénomènes naturels complexes, et de classer les systèmes complexes par les équilibres dynamiques stables auxquels, dans cette construction simplifiée, répondent les enveloppes terrestres. Les lois d'équilibre, sous leur forme mathématique générale, ont été exposées par J. W. Gibbs (1884-1887), qui les ramène aux relations pouvant exister entre les variables indépendantes caractéristiques des processus physiques ou chimiques : température, pression, état physique et composition chimique des corps qui participent aux processus. Toutes les géosphères (enveloppes terrestres) introduites dans la science par voie purement empirique, peuvent être distinguées par les différentes variables qui caractérisent, selon Gibbs, les équilibres étudiés par lui. On peut distinguer ainsi **les enveloppes thermodynamiques** déterminées par les valeurs de la température et de la pression, **les enveloppes des états de la matière**, caractérisées par les phases, c'est à dire par l'état physique (solide, liquide, etc.) des corps entrant dans leur composition, enfin **les enveloppes chimiques**, qui se distinguent par leur composition chimique. »

A partir de quoi, il caractérise la Biosphère (Vernadsky, 1929, p.163) comme une enveloppe thermodynamique superficielle, un « champ thermodynamique », d'une pression voisine d'une atmosphère et d'une température allant de +50° à -50° (sa température moyenne actuelle est de 15°) auquel il affecte par ailleurs des limites bien précises fonction de sa composition chimique et des états de la matière qu'on y trouve.

Vernadsky (1936, p. 43 - traduction personnelle de l'anglais) : « La Biosphère peut être précisément exprimée, quantitativement, en atomes - comme les organismes vivants ; elle 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**. Elles s'étendent vers le haut aux frontières de la stratosphère, jusqu'à 20 km au dessus du niveau du géoïde, à partir d'où l'eau sous quelque forme qu'elle soit est pratiquement et probablement absente, et vers le bas à 3-4 km au dessous des terres où la phase liquide de l'eau cesse d'exister, et où sa phase gazeuse commence à prédominer. Ici la vie anaérobie commence à être prévalente. Sous le fond des océans elle ne semble pas s'étendre jusqu'à une profondeur considérable. Mais ici notre connaissance est si maigre que de nouveaux faits exacts doivent être attendus (on a appris depuis l'existence des « fumées noires » des sources hydrothermales, dont il supposait l'existence dans La Biosphère). Les formes latentes de la vie - dans un état inerte déterminé - s'étendent bien au-delà de la Biosphère à la fois vers le haut et vers le bas. La composition chimique de la Biosphère est fortement distincte de celle de la croûte terrestre, mais elle n'est pas connue de nous avec un degré suffisant de précision. Les « clarks » (pourcentages d'éléments chimiques) de la Biosphère sont différents de ceux de la croûte terrestre. »

La phrase soulignée en gras est de notre fait, et nous allons l'expliquer. Ceci dit, ainsi positionnée dans un cadre thermodynamique et encadrée par ses frontières, la Biosphère pourrait illustrer l'exemple que nous donnait Prigogine à propos d'un réservoir.

Reprenons cet exemple (Prigogine, 1993, p. 29) : « Prenons un réservoir contenant de la matière, **isolé du monde**. Ce système va atteindre l'équilibre... Si maintenant nous ouvrons le système et que nous permettons à des flux d'énergie et de matière de pénétrer dans le système, la situation change radicalement. D'un côté, à l'échelle macroscopique, nous avons des phénomènes irréversibles, flux de chaleur, réactions chimiques, qui conduisent à de nouvelles structures spatio-temporelles impossibles à réaliser à l'équilibre. D'un autre côté, le chaos moléculaire s'organise et donne lieu à des brisements de symétrie temporelle, à des brisements de symétrie d'espace. »

Nous retrouvons dans cette citation les « dissymétries » (de Pasteur) étudiées par Vernadsky, ce qui a vocation à confirmer le principe d'ouverture de la Biosphère.

Et aussi le concept de « stabilité » sur lequel Vernadsky insistait tant qu'il nomma le champ thermodynamique (primaire) de la Biosphère, le « champ de stabilité vitale », propre aux organismes vivants de premier ordre.

Vernadsky (1929, pp. 163..166) : « *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. »*

Nous retrouvons par ailleurs dans les deux textes d'une part l'idée de l'ouverture d'un système, d'autre part celle de l'élargissement progressif de la Biosphère, cohérente avec le concept d'une origine et d'une évolution de la Biosphère, sur lequel Vernadsky restera ambigu jusqu'en 1930-1931. Elle nous suggère que la géosphère supérieure, avec l'émergence de la Biosphère, serait progressivement passée au cours des ères géologiques d'un état tendant vers un certain équilibre, à un état d'ouverture progressif comprenant des cycles d'échange de matière et d'énergie de plus en plus dynamiques la conduisant vers la stabilité.

Ce que toutes les avancées les plus récentes de la géochimie, de la biologie, de la biogéochimie nous confirment aujourd'hui. Avec notamment ce phénomène dénommé la « grande oxydation », qui vérifie de manière étonnante les généralisations empiriques de Vernadsky.

5.3.4 Stabilité de la Biosphère et stabilité de l'eau liquide

Examinons maintenant cette phrase de Vernadsky que nous avons souligné : « ... 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. ».

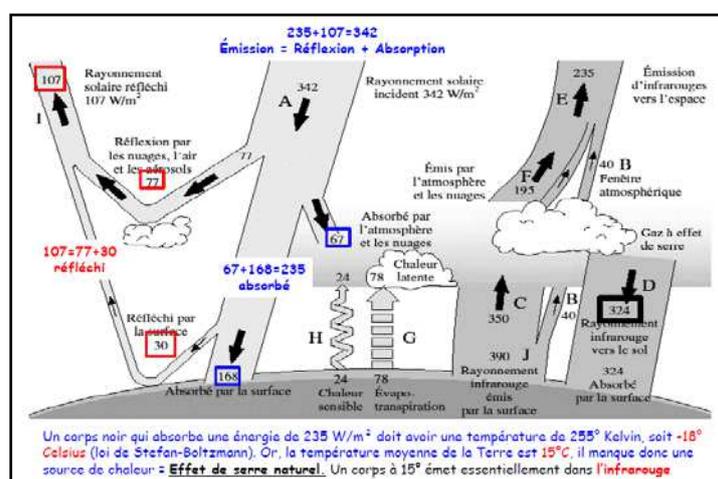
Existerait-il donc une relation entre stabilité de la Biosphère et stabilité de la phase liquide de l'eau ? Tout comme l'oxygène, l'eau, **sous sa forme liquide**, aurait-elle existé « avant » l'expansion de la Biosphère sur la surface terrestre originelle ?

Ou l'eau aurait-elle évolué vers un état « stable » (sa phase liquide, on la nomme souvent « eau libre ») au prorata de la stabilisation progressive de la Biosphère, corrélative à l'expansion progressive de l'oxygène libre, elle même corrélative au développement progressif de la matière vivante ?

Du seul fait que la Biosphère soit regardée comme un système ouvert évoluant vers l'état stable, au titre de la thermodynamique irréversible et de la théorie générale des systèmes, la réponse à cette question pourrait nous apparaître relativement évidente.

Nous savons en effet que la Terre a aujourd'hui un « bilan radiatif » qui lui donne, à l'équilibre, une température hypothétique moyenne de surface de -18° .

Figure 16 : Bilan radiatif de la Terre, en W/m^2



Source : Francour, après 2007

Cet « équilibre » caractérise-t-il un système plutôt isolé ou fermé au sens thermodynamique ? Pour les planètes du système solaire qui toutes reçoivent son énergie, certains spécialistes de l'exobiologie se réfèrent plutôt au concept « d'état stable abiotique ».

Ceci étant, les faits constatés, c'est une température annuelle moyenne de surface de la Terre de 15°C. L'explication généralement avancée, comme on peut le lire dans la légende de la figure 16, tient à « l'effet de serre naturel », c'est à dire le forçage radiatif de certains gaz, tels le CO₂ (gaz carbonique), le CH₄ (méthane), le N₂O (protoxyde d'azote),..., qui ensemble participent à la génération de l'effet de serre.

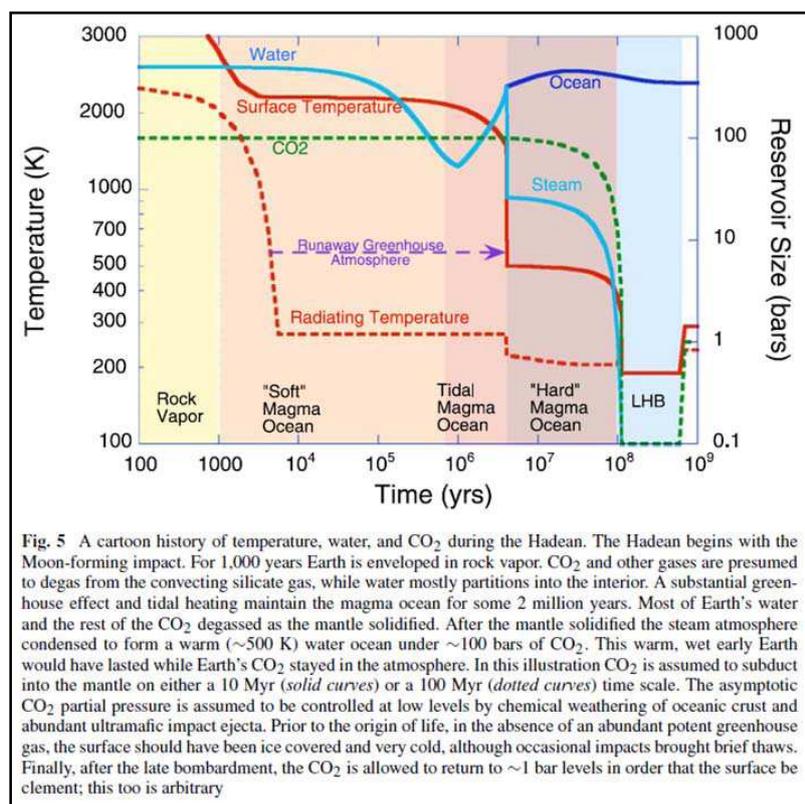
C'est le chimiste suédois Svante Auguste Arrhénius (1859-1927) qui en effet a montré que le CO₂ pouvait absorber de grandes quantités de chaleur. Il a alors émis l'hypothèse que la combustion d'énergies fossiles pouvait entraîner le rejet d'assez de CO₂ pour réchauffer la Terre. Il estima que le doublement du CO₂ dans l'atmosphère pouvait entraîner une augmentation de 4 à 6°C.

La question reste alors de savoir quelles pouvaient être les concentrations de CO₂ dans l'atmosphère, et les températures corrélatives, lors des premiers temps d'évolution de la surface terrestre.

La réponse la plus récente nous est donnée par Kevin Zahnle (et al.) et David Des Marais, de la branche « Exobiologie » de la NASA. Cette branche (dite SSX) conduit des recherches en vue de comprendre la chimie prébiotique et l'origine, l'évolution, la distribution et le futur de la vie dans l'Univers. Elle constitue à cette fin un interface entre la communauté académique extérieure et les programmes de la NASA, qui informe les missions chargées de détecter des « biosignatures » dans les exoplanètes (extérieures au système solaire). Voir si besoin : <http://spacescience.arc.nasa.gov/branch/exobiology-branch-code-ssx>

Dans un premier graphique, Zahnle et al. (2007) nous dressent une histoire de la température, de l'eau et du CO₂ durant l'Hadéen, depuis l'impact de formation de la Lune, il y a environ 4,5 milliards d'années. Nous avons gardé sa légende d'origine afin que les auteurs puissent nous le commenter eux-mêmes (Note : le sigle LHB est relatif à une période de l'Hadéen en relation avec la Lune, mais nous n'avons pu trouver sa signification exacte. Peut être la fin des répercussions de son impact de formation ?!).

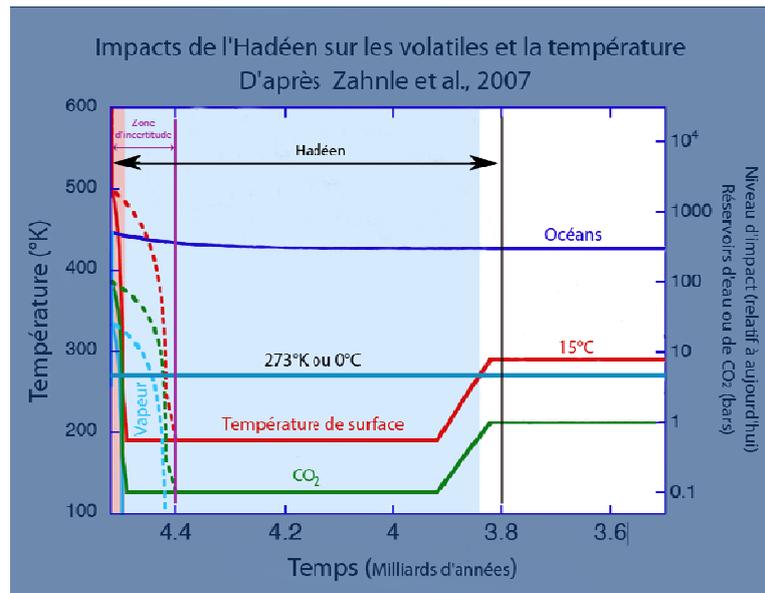
Figure 17 : Histoire de la température, de l'eau et du CO₂ au début de l'Hadéen



Source : Zahnle et al., 2007 : Emergence of a Habitable Planet

Un second graphique effectuée à la suite du premier un zoom sur la période (entre 10⁸ et 10⁹ années) qui a suivi les débuts de l'Hadéen. Il correspond au refroidissement rapide de la croûte terrestre qui marque la fin des répercussions de l'impact de formation de la Lune, puis à la remontée de la température de surface. Nous l'avons repris à Des Marais (2009), qui l'a lui-même repris à Zahnle et al. (2007), mais dans une version particulière du même article (Emergence of a Habitable Planet) à laquelle nous n'avons pu avoir accès. Nous avons traduit les légendes de ce graphique en français, l'avons épuré de données inutiles à notre propos et complété de quelques détails. On constatera qu'il y a entre les deux graphiques un changement d'échelle de pression des réservoirs, relativement à la température, qui peut induire des erreurs d'interprétation pour l'océan. Il ne faut donc considérer ce dernier qu'en rapport à la pression.

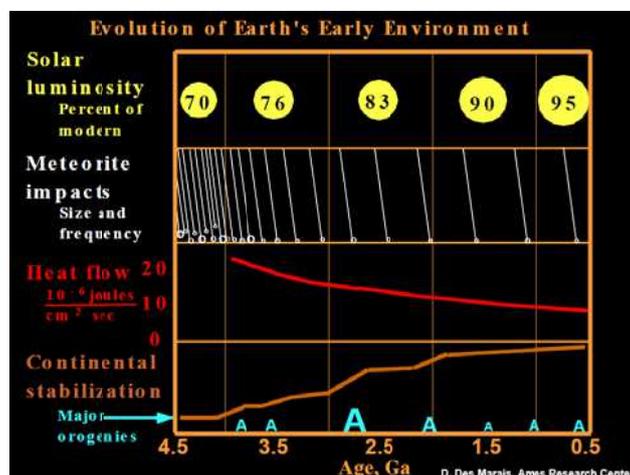
Figure 18 : Variations de température de surface et de pression CO₂ lors de l'Hadéen



Source : Loiret, 2011, d'après Zahnle et al., 2007

Ce graphique est très parlant. Après les cent millions d'années durant lesquels la température de surface de la Terre serait restée autour de 500° Kelvin (-273 = 227°C), avec une pression (relative) de CO₂ plus de cent fois supérieure à sa pression actuelle (figure 17), la surface terrestre aurait rapidement évolué vers ... un état stable abiotique !, avec une température tombant à 190° Kelvin (- 83°C), et une pression relative de CO₂ tombant à un niveau dix fois inférieure à sa pression actuelle. Ceci compte tenu notamment d'un rayonnement solaire alors 30% (et ponctuellement 50%) inférieur à son niveau actuel.

Figure 19 : Evolution de l'environnement terrestre depuis l'Hadéen



Source : Des Marais, 2009

Ce qui voudrait donc dire, comme le confirme sur la figure 19 l'impact de plus en plus faible des météorites, que la Terre aurait été « dans ces moments là » un système de plus en plus fermé (comme le pensait Georgescu-Roegen), qui aurait atteint cet équilibre dit stable de l'état abiotique (stabilité sans effet de serre, tout comme la Lune) et y serait resté un long moment.

Et aurait dû probablement y rester pour l'éternité, au titre du second principe, si sa vocation n'avait pas été détournée !

Sa température de surface serait restée à -83°C pendant 600 millions d'années environ. Comme on peut le voir dans la partie en bleu clair des figures 17 et 18, et comme on peut le lire dans la légende de la figure 17, la lithosphère et surtout l'hydrosphère auraient alors été gelées sur des profondeurs très importantes.



Source : <http://www.cosmographica.com/gallery>

Jusque, pour l'océan, aux limites thermodynamiques de changement de phase solide/liquide de l'eau salée, notamment aux abords des courants et zones abyssales influencés par les sources hydrothermales et volcans sous marins, à haute température et grande pression, probablement alors beaucoup plus actifs qu'aujourd'hui.

5.3.5 Stabilité vitale et naissance de la Biosphère

Ce n'est qu'ensuite, entre -3,9 et -3,8 milliards d'années, alors que le rayonnement solaire augmentait progressivement (comparer les figures 18 et 19), que la température de surface serait remontée pour se stabiliser par étapes autour de 288 ° Kelvin (15°C), qui correspond à la température moyenne actuelle.

Cet intervalle de temps correspondrait donc à un « changement de phase » vers une nouvelle forme de stabilité qui aurait permis la forme stable de l'eau liquide.

Or ce même intervalle de temps correspond pour l'ensemble des sources étudiées (Margulis, 1986 ; Des Marais, 1998, 2009; Kump & al, 2001 ; Falkowski & al., 2008 (b) ; Grenfell & al., 2008 ; Zahnle & al., 2010, ...), au moment d'apparition des premières formes vivantes et communautés trophiques bactériennes.

Ce qui nous autoriserait à établir une corrélation étroite entre développement du vivant et stabilité climatique. Ce qui a été confirmé en 2008, dans son principe général, par un collectif de 22 chercheurs en exobiologie, dans l'article « Co-evolution of atmospheres, life, and climate » (Grenfell et al., 2008). Mieux qu'une corrélation, ces chercheurs évoquent aujourd'hui le concept d'une « co-évolution ». Extrait du résumé de l'article (traduction personnelle) : « *Notre propre planète est un très bon exemple de comment les formes de vie ont modifié l'atmosphère tout au long du temps de vie de la planète. Nous montrons que ces faits doivent être pris en compte quand nous découvrons et caractérisons les atmosphères d'exoplanètes similaires à la Terre. Si la vie a son origine et a évolué sur une planète, il faudra alors s'attendre à ce qu'une forte coévolution soit intervenue entre la vie et l'atmosphère, dont le résultat est le climat de cette planète.* »

Toutes choses qui vérifient aujourd'hui les généralisations de Vernadsky (et donc l'hypothèse de Lovelock), en ce qui concerne les frontières de la Biosphère, encadrées par la stabilité du climat et de la phase liquide de l'eau.

Et qui nous donnent finalement une « date de naissance » de la Biosphère et de son champ de stabilité, soit entre -3,9 et -3,8 milliards d'années (en l'état actuel de nos connaissances). Date que nous pouvons comparer avec ce qu'en disait Vernadsky.

(Vernadsky, 1931, p. 4) : « *Le champ vital - c'est-à-dire la température et la pression, ainsi que le climat qui en dépend et le caractère chimique du milieu propices à la vie - existent incessamment, sans interruption, demeurent en somme permanents depuis l'ère archéenne... La plus grande partie de l'ère archéenne avait été pénétrée par la vie, analogue à celle d'aujourd'hui dans ses traits essentiels, génétiquement liée avec elle.* »

(Vernadsky, 1931, p. 7) : « *La vie et tous les organismes vivants constituent une partie indissoluble et normale de la biosphère. La biosphère même n'est pas une formation accidentelle, c'est un mécanisme déterminé, un système dynamique stable, un équilibre qui s'est établi en ses traits essentiels depuis son commencement, c'est-à-dire du début ou du milieu de l'ère archéenne, depuis l'archéozoïque⁴⁷ et qui a existé incessamment...* » .

On constatera sur l'échelle des temps géologiques (figure 8) que le début de l'ère archéenne, cité par Vernadsky pour l'origine de ce « système dynamique du champ de stabilité vitale » (il nous faut nous adapter en continu à ses variations de terminologie), correspond à environ -3,9 milliards d'années, ce qui anticipait parfaitement la date de naissance officielle aujourd'hui admise.

5.4 Espaces sémantiques de la Biosphère

On comprendra mieux maintenant pourquoi Vernadsky nommait le champ thermodynamique primaire de la Biosphère, le champ de stabilité vitale.

C'est dans ce champ, sans lequel la vie ne saurait ni émerger ni exister, que furent en effet établies *Les conditions d'apparition de la vie sur Terre*, titre de cet article de 1931 où il admet désormais l'idée d'une émergence progressive de la Biosphère.

Vernadsky (1931, p.1) : « *Les conditions qui déterminent la première apparition de la vie sur la terre sont identiques à celles qui déterminent la formation, la genèse de la biosphère sur notre planète. Ainsi, le problème du commencement de la vie sur la Terre se réduit scientifiquement au problème de l'apparition de la biosphère sur celle-ci.* ».

Quel est donc ce problème ?

5.4.1 Fonder l'espace du vivant dans la structure terrestre: La dissymétrie hydrosphère/lithosphère

Il commence par la mise en place d'une structure complexe, non homogène, de l'espace de la Biosphère, susceptible de différencier le « domaine du vivant » de la matière brute.

Vernadsky, (1931, p.2) : « *Tous les jugements portés sur le commencement de la biosphère doivent avant tout expliquer la structure complexe non homogène de l'espace de la biosphère, la différence physique profonde qui sépare les espaces de la biosphère occupés par les organismes vivants de ceux qui sont occupés par la matière brute.* »

Cette structure complexe est liée à la génération d'une « toute première dissymétrie » (selon Pasteur et P. Curie) dans l'écorce terrestre, qui va fonder une « différence primaire » dans l'homogénéité planétaire, en permettant la séparation entre hydrosphère et lithosphère. On pourra regarder cette « différence » comme le fondement « premier » d'une diversité qui aurait été ainsi géologique bien avant d'être biologique. Elle va lier pour toujours la masse des océans à celle de la Lune.

⁴⁷ L'Archéozoïque est l'ancien nom pour le Précambrien

Vernadsky, (1931, pp. 11-12) : « On peut aujourd'hui, à ce qu'il paraît, essayer d'établir ... le moment de la formation de la biosphère...Deux problèmes géologiques fondamentaux demeurant en dehors des phénomènes géologiques habituels et du domaine des grands problèmes tectoniques intéressent en ce moment profondément la pensée géologique. Ces deux problèmes sont : la question de la formation de la Lune et celle de la formation de l'Océan Pacifique ou plus exactement de la genèse d'une dissymétrie particulière dans la structure de l'écorce terrestre. A mesure que nous nous enfonçons dans l'étude des phénomènes actuels et passés, cette dissymétrie se révèle toujours davantage. La dissymétrie de l'écorce terrestre se manifeste premièrement par la distribution diverse des continents et des océans sur la surface terrestre et secondement par le fait que cette distribution superficielle est en réalité liée de la manière la plus étroite avec la structure profonde de l'écorce terrestre. Il n'existe pas sous le fond de l'Océan plusieurs géosphères, qui se trouvent cependant dans la structure des continents - telles sont la stratosphère, la géosphère métamorphique et généralement la géosphère granitique. Il se produit ainsi une dissymétrie nette dans les couches superficielles de la planète. Qui plus est cette dissymétrie se transmet aussi à la troposphère. Elle a aussi des propriétés spécifiques (par exemple l'ionisation) au-dessus de l'Océan, qui manquent dans ses parties continentales. La dissymétrie de l'écorce terrestre peut être expliquée si on la rapporte à la genèse de la Lune du sein de la Terre et si l'on admet qu'elle fut créée au moment de la catastrophe unique et d'intensité maximale que subit notre planète. Les bassins océaniques, comme l'a déduit le prof. G. Pickering (1907-1924) en se basant sur les considérations de la théorie de la Lune, se sont formés dans les crevasses terrestres, qui se produisirent lors de la formation de la Lune des parties de notre planète. »

Et Prigogine a lui même insisté, alors qu'il décrivait une dissymétrie dans la formation d'une structure dissipative, sur cette fonction dissymétrique en regard de l'apparition du vivant (Prigogine, 1993, p. 33) : « Il est amusant de rappeler ici l'importance qu'attachait Pasteur à la symétrie moléculaire. Pour lui, la différence entre les cristaux lévogyres ou dextrogyres était essentielle pour comprendre le phénomène de la vie. Pasteur n'a-t-il pas écrit : « La vie telle qu'elle se manifeste à nous est une fonction de l'asymétrie de l'Univers et une conséquence de ce fait. » ! L'univers est dissymétrique. Nous comprenons mieux cette affirmation aujourd'hui puisque le brisement de symétrie auquel Pasteur fait allusion est lié au non-équilibre, à l'irréversibilité. Quand à l'irréversibilité, elle nous apparaît elle-même comme une conséquence de l'instabilité inhérente aux lois dynamiques de la matière. »

Citation qui convient à notre propos, sauf à ce qu'il soit plus explicite dans la suite des concepts thermodynamiques, qui passent de l'équilibre des systèmes clos à l'état stationnaire (et/ou stable ?) des systèmes fermés et ouverts, puis à l'« instabilité » tout court, ou à l'« instabilité stabilisée » des structures dissipatives.

Car de quelle nouvelle forme de « stabilité » des lois dynamiques de la matière, vivante cette fois, devra-t-on parler quant à l'évidence, montrée par Vernadsky, d'une « stabilité » du climat instaurée par la matière vivante dans la Biosphère ? Serait-ce une « instabilité stabilisée » ?, qui ferait de ce fait des différents cycles internes à la Biosphère relatifs au climat des structures dissipatives ?!

Structures dissipatives d'entropie et productrices d'ordre et d'organisation donc (principe SBVB), mais organisation consommatrice d'une entropie négative qui proviendrait d'où alors ?

Mais finissons sur le détachement de la Lune.

Vernadsky, (1931, pp. 12-13) : « Récemment, en développant plus profondément et en précisant les travaux fondamentaux de G. Darwin dans ce domaine, R. Schwinner⁴⁸ a essayé de lier la formation de la Lune avec les grandes périodes tectoniques que les géologues ont constatées dans l'histoire de notre planète... Il a admis que la formation de notre satellite coïncidait avec le plus ancien des grands mouvements tectoniques qui eurent lieu à l'époque laurentienne. Il pense que l'étude des roches laurentiennes permet de les distinguer des roches archéennes plus jeunes. Et enfin il énonce la grande probabilité du très rapide rétablissement après le détachement de la Lune de conditions de climat, en somme depuis immuables, identiques à celles qui existent aujourd'hui à la surface

⁴⁸ Schwinner, R., 1928. Mitt. d. Geolog. Ges. Wien., XIX, W (reprise en l'état de la référence de Vernadsky)

terrestre et y déterminent la présence ininterrompue de la vie... La biosphère a dû donc avoir pris naissance près de ce moment critique de la Terre. »

On reconnaîtra dans les dernières lignes de cette dernière citation une description qui anticipait de 80 ans la vision actuelle des premiers temps d'évolution de notre planète, dont témoignent les travaux de Zahnle (figures 17 et 18), qui représenteraient aujourd'hui une synthèse de nos réflexions les plus avancées à ce sujet.

5.4.2 Structurer l'espace du vivant

C'est à partir de cette grande dissymétrie que Vernadsky structure ensuite les différents champs d'action du vivant dans la Biosphère. Nous entrons ici dans une « matière » de la pensée vernadskienne sémantiquement difficile à clarifier, pour de nombreuses raisons, mais notamment du fait, chez Vernadsky, de son caractère très anticipateur de découvertes scientifiques futures, qui permettront beaucoup plus tard seulement de préciser et nommer ces champs sémantiques nouveaux qu'il chercha à décrire en l'état des connaissances de son temps.

Nous allons devoir entrer de ce fait, au long des paragraphes suivants, dans un exercice de découpage sémantique au scalpel de ses différents concepts sur le vivant et son habitat, puis de recomposition d'ensemble.

A partir de quoi nous proposerons des compléments terminologiques susceptibles de clarifier définitivement toutes les confusions historiques faites autour du concept de Biosphère.

5.4.2.1 Matière vivante « et » organismes vivants

Vernadsky (1924, p.9) : *« J'emploie ici comme antérieurement le terme de matière vivante. Je le fais en toute conscience de cause. Les organismes se manifestent tout autrement dans les phénomènes géologiques et géochimiques que dans les processus biologiques. L'organisme individuel y disparaît, les propriétés morphologiques perdent leur importance. Les agglomérations des organismes, et non leurs individus jouent un rôle dans les phénomènes grandioses de la nature. La masse des organismes, leur composition chimique, leur énergie se manifeste dans les processus géochimiques. Aussi je ne considérerai les organismes qu'exclusivement à ce point de vue et appellerai matière vivante l'ensemble des organismes réduits à leurs poids, à leur composition chimique et à leur énergie. La matière vivante ainsi conçue peut être comparée à d'autres corps, qui jouent un rôle dans la chimie de l'écorce terrestre, — aux minéraux, aux roches, aux gaz et aux liquides. »*

Nous pouvons tirer de cette citation deux aspects différents desquels nous pouvons dégager une ligne de structuration de notre analyse.

5.4.2.1.1 Masse homogène et organismes autonomes

En premier lieu, parlant de « matière vivante », Vernadsky nous indique qu'il observe les organismes vivants tout autrement que dans leur caractère d'individus autonomes et hétérogènes, tels que la biologie les observe en général.

Il les observe dans ce cas en tant que populations formant des masses homogènes aux propriétés morphologiques non différenciées (mais par contre, nous le verrons, aux « fonctions » différenciées), dans le cadre spécifique des relations étroites (co-évolution) qu'elles ont établies dès l'Archéen avec les processus « géologiques » pour la formation de la Biosphère.

Et il nous dit bien que quand il considèrera par ailleurs les « organismes » vivants individuels, ce ne sera qu'exclusivement à ce point de vue de masse indifférenciée de matière vivante.

Lynn Margulis, une biologiste américaine de renom, qui a repris à son compte les travaux et généralisations empiriques de Vernadsky, nous explique la très grande difficulté qu'ont encore les biologistes modernes à caractériser cette forme de matière vivante dans ses relations particulières avec le milieu géologique.

Margulis (1986, p. 72) : « *En fait, le lien vital entre l'environnement terrestre et les organismes qui l'habitent met les biologistes dans l'impossibilité pratique de donner une définition claire et concise de la différence entre la matière vivante et la matière non vivante.* »

Ce qui confirme bien la difficulté de la tâche et dégage Vernadsky de toute inconséquence.

Puis L. Margulis nous décrit le caractère homogène de ce « tapis » (bio-film) de matière vivante de l'Archéen, en même temps que les fonctions différenciées qu'il exerçait dans un milieu terriblement agressif alors non protégé des rayons ultra violets par la couche d'ozone.

Extrait (Margulis, 1986, p. 81) : « *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 pourpres ou marrons 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.* »

Puis tout en précisant leur fonction globale, elle désignera par un nom spécifique le super ensemble que formèrent ces tapis bactériens (ou pellicules microbiennes, ou bio-films).

Margulis (1986, p. 64) : « *... 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. Les témoignages des fossiles se succèdent sans discontinuité, ils montrent qu'à aucun moment la température et l'atmosphère de la planète n'ont détruit toute la vie.* »

Une fonction comme nous l'avons vu confirmée en 2010 par les découvertes les plus récentes et de nombreux chercheurs. Mais poursuivons.

Vernadsky (1929, pp. 154-155) : « *Les organismes vivants, bien qu'ils introduisent dans les processus physico-chimiques de l'écorce terrestre l'énergie lumineuse du soleil, se distinguent aussi nettement et par leur essence même de toutes les autres variables indépendantes de la biosphère. Comme elles, ils changent la marche de leurs équilibres⁴⁹, mais contrairement à elles, ils sont eux-mêmes spécifiquement indépendants des espèces de systèmes d'équilibre dynamiques secondaires, dans le **champ thermodynamique primaire** de la biosphère. **L'autonomie des organismes vivants** est l'expression du fait que les paramètres du champ thermodynamique à eux propres sont absolument différents des paramètres observés dans la biosphère. Les organismes vivants maintiennent en rapport avec ce fait, certains même très nettement, leur propre température indépendante de celle du milieu ambiant, et possèdent leur propre pression interne. Ils sont isolés dans la biosphère, et le champ thermodynamique de celle-ci n'a d'importance pour eux que parce qu'il détermine la région de l'existence de leurs systèmes autonomes, mais non leur champ interne.* »

En caractérisant bien l'autonomie des organismes, Vernadsky nous permet ici de confirmer, par comparaison à sa citation du début de paragraphe, qu'il entend bien par « matière vivante » le seul fonctionnement comme masse homogène des organismes vivants primitifs du « microcosme », tel qu'il perdure jusqu'à nos jours, quoique dans des conditions très différentes.

Ceci conformément à son expression selon laquelle il ne considèrera les « organismes vivants » qu'exclusivement au point de vue de masse homogène de matière vivante.

Toutes ces clarifications préalables sont ici très importantes, parce que Vernadsky reviendra en 1945 sur la matière vivante, en ayant semble-t-il tout oublié de ce qu'il avait précisé auparavant,

⁴⁹ On reconnaîtra parmi ces variables indépendantes les « structures dissipatives » de Prigogine.

généralisant ainsi tout au long de la lecture de ses travaux des confusions sémantiques incessantes, très difficiles à démêler en même temps que très dévoreuses de temps. Ce qui justifiera d'autant toutes les confusions ultérieures sur la Biosphère.

En effet (Vernadsky, 1945, p.52) : « *La « matière vivante » est la totalité des organismes vivants. C'est une généralisation scientifique, empirique, de faits empiriques indiscutables connus de tous, observable facilement avec précision.* »

Il annulerait donc ici toutes ses précisions antérieures ! Mais nous comprenons d'autant cette difficulté d'un découpage spatio-temporel précis entre matière et organismes vivants, que cette matière vivante « originelle » du microcosme se diffuse aujourd'hui dans tous les compartiments de la Biosphère, y compris au sein même des organismes vivants.

Margulis (1986, p.65) : « *Les hommes s'autorisent à polluer l'air et l'eau de leurs petits enfants et à hâter leur disparition, mais le microcosme n'en continuera pas moins de vivre. Le corps humain est composé de 10^{16} (10 millions de milliards) cellules animales et 10^{17} (100 millions de milliards) cellules bactériennes... Le microcosme continue d'évoluer autour d'eux et en eux. Nous pourrions même dire, comme nous le verrons, que le microcosme évolue au travers des êtres humains.* »

5.4.2.1.2 Milieu géologique et milieu biologique

En second lieu, quand il dit « : « *Les organismes se manifestent tout autrement dans les phénomènes géologiques et géochimiques que dans les processus biologiques.* », Vernadsky dégage un fait établissant une autre différence essentielle entre matière vivante et organismes vivants. La matière vivante des premiers temps géologiques travailla et se développa, durant des centaines de millions d'années, dans un milieu minéral absolument inerte, totalement anoxique et toxique. Ceci quand, après qu'elle ait « produit » la Biosphère, les organismes vivants (autonomes) se développeront pour leur cas dans un milieu « biologique », tel qu'il fut produit par la matière vivante.

Ce qui suppose bien « deux catégories fondamentales du vivant », dont la différenciation première s'avère d'une importance critique quant à l'étude des « sphères distinctes » constituant leurs habitats, et quant à l'étude des relations entre ces sphères et leurs habitants.

Découpage en deux catégories qui est à mettre en relation avec le découpage en deux aspects des principes biogéochimiques de Vernadsky.

5.4.2.2 Champs thermodynamiques de la matière vivante « et » des organismes vivants

Afin de continuer à caractériser, et d'autant mieux « stabiliser » ce découpage entre matière vivante et organismes vivants, tout aussi fondamental pour l'histoire de la vie que pour celle des relations entre géologie et biologie, nous étudierons un autre découpage sémantique, « complémentaire » au précédent, qu'établit Vernadsky entre un champ thermodynamique propre aux organismes vivants, d'une part, et un champ thermodynamique propre à la Biosphère (et à sa matière vivante homogène), d'autre part.

Vernadsky introduit à de nombreuses reprises dans ses travaux une distinction explicite entre deux milieux chimiques et/ou « champs thermodynamiques » spécifiques : la Biosphère, qu'il nomme le « domaine de la vie », et un autre milieu et/ou champ tout à fait distinct, propre à la vie elle-même.

Vernadsky (1929, p.65) : « *Le mécanisme de l'action chimique de la matière vivante nous est inconnu. Il semble cependant qu'on commence à se rendre compte du fait que la photosynthèse, au point de vue des phénomènes énergétiques, s'effectue dans la matière vivante non seulement en un milieu chimique particulier, mais aussi dans un champ thermodynamique particulier distinct de celui de la biosphère...Le domaine des phénomènes dans l'intérieur de l'organisme (« le champ de la matière vivante ») se distingue aux points de vue thermodynamique et chimique du « champ » de la biosphère.* »

Nous voyons ici apparaître le concept d'un champ thermodynamique du vivant différent de celui de la Biosphère en soi. Constatons simplement que Vernadsky utilise ici encore le terme de

matière vivante, alors que conformément à nos clarifications antérieures, il aurait du utiliser celui d'organisme. Mais il va corriger plus loin ce glissement sémantique.

Vernadsky (1929, p.78) : « *Les animaux et les champignons accumulent les corps riches en azote, corps qui deviennent des agents de modification encore plus puissants, des centres d'énergie chimique libre, lorsque après la mort et la destruction des organismes ou bien en se dégageant de ceux-ci, ils quittent le champ thermodynamique où ils furent stables et pénètrent dans la Biosphère, dans un autre champ thermodynamique, où ils se décomposent en dégageant de l'énergie.* »

Faisons une pause sur cette citation. Vernadsky nous dit bien ici qu'il y a un champ thermodynamique propre aux organismes vivants autonomes que sont les animaux et les champignons, et qu'à leur mort, et à leur mort seulement, ils pénètrent dans la Biosphère (ce qui voudrait bien dire selon Lapalisse que jusqu'alors ils n'y étaient pas ! Mais où étaient-ils alors ?).

Mais la chose va plus loin. Si après leur mort ils se décomposent dans la Biosphère, c'est qu'il existe bien dans le champ thermodynamique de cette Biosphère « quelque chose » qui les décompose. Et quoi d'autre que les microbes, ces « autres » organismes vivants, fondamentalement différents des autonomes, sans lesquels « rien » ne se décomposerait⁵⁰. Il s'agit donc bien ici de nos microbes « décomposeurs » du microcosme, soit la « matière vivante », pour laquelle Vernadsky hésitera entre les termes d'homogène et hétérogène pour des raisons que nous comprendrons à la fin de cette étude du 1^{er} principe.

Ce qui confirme le découpage entre deux champs thermodynamiques, des organismes vivants d'une part, et de la matière vivante de l'autre. Mais continuons tout de même.

Vernadsky (1929, p.155-159) : « *Les organismes vivants, bien qu'ils introduisent dans les processus physico-chimiques de l'écorce terrestre l'énergie lumineuse du Soleil, se distinguent aussi nettement et par leur essence même de toutes les autres variables indépendantes de la biosphère. Comme elles ils changent la marche de leurs équilibres, mais contrairement à elles, ils sont spécifiquement indépendants des espèces de systèmes d'équilibres dynamiques secondaires, dans le champ thermodynamique primaire de la biosphère.*

L'autonomie des organismes vivants est l'expression du fait, que les paramètres du champ thermodynamique à eux propres sont absolument différents des paramètres observés dans la biosphère...Ils sont isolés dans la biosphère, et le champ thermodynamique de celle-ci n'a d'importance pour eux que parce qu'il détermine la région de l'existence de leurs systèmes autonomes, mais non leur champ interne...

Notre confusion transpire de nouveau dans cet extrait, et elle reviendra plus forte encore, juste à sa suite, y compris cette fois entre matière et organismes.

Vernadsky (1929, p. 159) : « *Le champ thermodynamique de la matière vivante est nettement différent de celui de la biosphère, bien qu'il soit impossible d'expliquer son existence autonome. C'est un fait fondamental que les organismes vivants peuvent être décrits empiriquement comme des champs thermodynamiques particuliers, étrangers à la biosphère, isolés en cette dernière... De quelque façon qu'on explique leur existence et leur formation dans la biosphère, le fait du changement de tous les équilibres chimiques dans ce milieu en leur présence demeure certain. On ne connaît pas au juste le changement de l'état des atomes dans ce mode de gisement⁵¹* »

Le problème ici, c'est quand Vernadsky nous dit qu'il est impossible d'expliquer l'existence autonome du champ thermodynamique de la matière vivante dans la Biosphère, car il a passé des dizaines de pages à nous expliquer que c'est cette matière vivante (et non pas les organismes

⁵⁰ Lors des premières expéditions faisant suite à la découverte des « fumeurs noirs », au fond des abysses océaniques, il advint une fois qu'un chercheur oubliât son « sandwich » dans l'enceinte isolée d'un appareil de mesure laissé volontairement sur place, à plusieurs milliers de mètres de profondeur. Quand deux ans plus tard l'équipe revint pour récupérer l'appareil, elle trouva le sandwich exactement dans le même état où il se trouvait deux ans auparavant. Ce qui témoigna d'une part qu'il n'y avait aucune bactérie dans les environs, et d'autre part qu'en l'absence de microbes il n'y a aucune décomposition. Ce qui va sans dire, mais est mieux en le disant !

⁵¹ On notera que Vernadsky se posait ici la même question que Schrödinger (1944), qui constata que la force de cohésion entre les atomes des molécules vivantes, vues comme des solides « aperiodiques », était radicalement différente de celle des solides « périodiques » inertes et de leurs molécules. Mais Vernadsky répondra en grande partie à cette question avec le concept de « dissymétrie » de Pasteur, repris par Pierre Curie (Vernadsky, 1930, 1931).

vivants « autonomes ») qui, comme nous allons le voir plus en détail, a entièrement « créé » la Biosphère. La Biosphère est l'expression directe de la matière vivante comme matière biogène formée par ses différents déchets, y compris corporels, et y compris ceux provenant du champ thermodynamique des organismes vivants.

La seule solution est celle du concept d'« habitat », valable pour l'ensemble des organismes vivants, hétérogènes ou homogènes, qui constitue un champ thermodynamique de protection (interface) entre les organismes et le milieu extérieur (la fourmi dans sa fourmilière, l'oiseau dans son nid, le renard dans sa tanière, l'homme dans sa maison,...). La Biosphère représente de ce fait l'habitat spécifique de la matière vivante, « **qui grandit avec elle** », et qu'il imprègne entièrement en retour de son propre champ thermodynamique, ... son « atmosphère » !

Ce qui suppose l'existence d'une masse de matière vivante homogène dans tout l'espace de la Biosphère, tout en même temps qu'elle sera susceptible d'exercer toutes fonctions spécialisées d'oxydoréduction.

Cette énigme, qui nous ramène à l'hésitation de Vernadsky entre homogénéité et hétérogénéité, sera résolue comme précédemment à la fin de cette étude quand nous étudierons plus en détail le concept de microcosme, qui établit une différence explicite entre fonctions et organes.

Notons cependant que les déchets non réutilisables de tous les organismes vivants ne stagnent jamais dans leur habitat (leur champ thermodynamique), et passent dans l'enveloppe immédiatement extérieure pour entrer dans un processus de recyclage, ce qui semble être une loi universelle. Ceci nous est confirmé par les déchets non réutilisables de la matière vivante, qui vont former des couches sédimentaires au fond de l'océan et sortir progressivement de la Biosphère pour entrer par subduction dans le manteau supérieur de la géosphère. Les déchets deviennent ainsi des indicateurs de frontière entre champs thermodynamiques.

Mais passons maintenant à cette dernière citation, plus tardive.

Vernadsky (1930, p. 14) : « *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.* »

Le glissement sémantique est maintenant complètement corrigé, et nous notons d'ailleurs qu'il parle bien ici d'un champ thermodynamique spécifique aux organismes vivants « du fait même de leur autonomie », contrairement à l'homogénéité (relative) de la matière vivante, et à son champ thermodynamique à elle, la Biosphère.

Ces concepts étant fixés, nous allons pouvoir continuer nos clarifications, faire des propositions complémentaires, et ainsi pouvoir ordonner dans une représentation systémique cohérente, jusqu'ici impossible à réaliser, l'ensemble des définitions premières et des métaconcepts apportés par Vernadsky.

Nous trouverons cependant dans la suite de notre analyse de la Biosphère quelques fines variations de terminologie faisant encore apparaître des ambiguïtés de détail quant aux justes découpages entre espèces, espaces et temporalités d'apparition. Nous les résoudrons en utilisant des termes complémentaires tels que par exemple la matière vivante de premier et de second ordre, pour différencier la nature des lits bactériens de l'Archéen des lits bactériens actuels. Ces précisions joueront un grand rôle dans le découpage ultérieur des frontières écosystémiques des organismes vivants.

5.4.2.3 Champs de stabilité « et » d'existence vitale

Continuons maintenant nos clarifications, y compris en revenant sur des citations antérieures.

Vernadsky (1929, pp. 163..166) : « *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. »

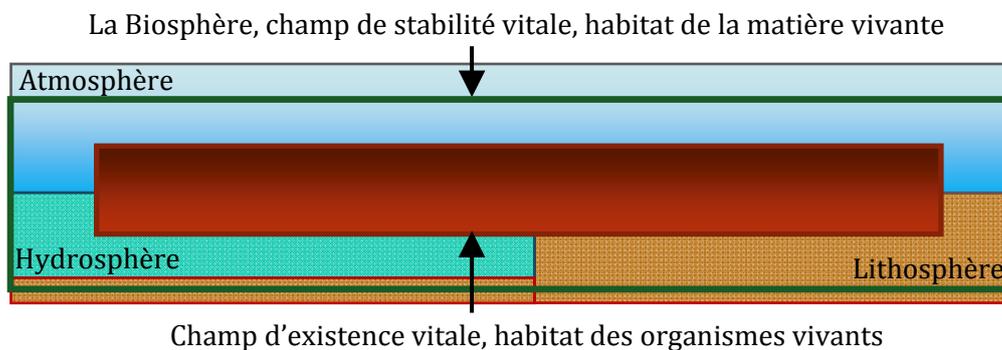
Suite aux diverses clarifications et paragraphes antérieurs, il apparaît maintenant hors de doute que le « champ de stabilité vitale » de la Biosphère, qui s'étend toujours plus loin dans les enveloppes terrestres suite à l'action continue de la matière vivante (on aurait retrouvé des bactéries jusqu'à 17 km de profondeur), fait référence à son habitat. Par différence, le « champ de l'existence vitale » fera donc référence à l'habitat des organismes vivants.

Il existe donc bien deux états du vivant, chacun dans leur habitat, formant ainsi deux champs thermodynamiques très différents que Vernadsky aura cherché à séparer tout au long de son œuvre (mais en étant souvent à court de réserves terminologiques) :

- D'une part la matière vivante dans son habitat spécifique, la Biosphère, autrement nommée « champ de stabilité vitale » (Vernadsky, 1929, pp. 163, 166, 193), ou « domaine de la vie ». Cet habitat s'étend toujours plus loin sur et sous la surface de la planète (Vernadsky, 1929, p.82). Il est à l'origine entièrement constitué de matériaux inertes de nature géologique, et il va être comme nous le verrons de plus en plus transformé en matière « biogène » par l'action de la matière vivante.
- D'autre part les organismes vivants dans leur habitat spécifique, nommé « champ d'existence vitale » (Vernadsky, 1929, pp. 166, 193). Cet habitat est à l'origine constitué de matière biogène, et deviendra avec le temps de plus en plus constitué de matière biologique, c'est à dire d'organismes vivants et de matière organique.

Etats et habitats du vivant que nous pouvons dès lors représenter ainsi :

[Figure 20 : Champs thermodynamiques de stabilité et d'existence vitale de la Biosphère](#)



5.4.2.4 Domaine « et » maison du vivant

Ce découpage entre matière vivante et organismes vivants, éclairé par leur différence de champ thermodynamique, introduit ainsi une séparation de plus en plus nette établissant comme une « frontière fondamentale », au sein de la Biosphère, entre le « **domaine** » du vivant, vu comme habitat de la matière vivante, et l'habitat des organismes vivants.

Il nous permet d'aligner mieux encore un ensemble de concepts tous présentés séparément les uns des autres dans *La Biosphère*, ce qui sinon demande un temps d'analyse considérable avant de pouvoir se former une image cohérente de la vision globale que Vernadsky cherche à nous transmettre.

Afin de continuer encore à préciser ses justes frontières de découpage, le rendre plus lisible pour toutes les disciplines à partir desquelles nous serions susceptibles de l'aborder, nous nommerons le champ d'existence vitale, la « **maison** » du vivant, vue comme habitat global des organismes vivants, construit par ces derniers comme un oiseau construit son nid ou un homme construit (ou construisait dans tous les cas) sa maison.

Sachant que ces habitats des organismes vivants sont comme nous le précisions plus haut soit tout aussi « vivants » que leurs habitants (comme la branche du hibou), soit au pire « biogènes » (comme le fond de la tanière d'un renard), car ils sont eux-mêmes dans la grande majorité des cas des organismes (ou ensembles d'organismes) vivants, à l'exemple d'une forêt.

Toutes choses qui, en termes systémiques, nous semblent parfaitement cohérentes. En effet, tout comme on les distingue dans l'analyse systémique ou dans l'analyse Input-Output, et tout comme il en est de la « maison » d'habitation et des bâtiments d'exploitation « dans » un domaine rural, ou des ateliers de fabrication « dans » une entreprise, la présence d'énergie et de matière « assimilable » dans la Biosphère impose qu'il existe « au sein » de celle-ci une nouvelle enceinte parfaitement spécifique et autonome, dans laquelle sera traitée la matière biogène (que nous allons aborder) spécifiquement « fabriquée » par la « matière vivante » : la maison du vivant.

5.5 Biosphère « et » Ecosphère

C'est au terme de ce réalignement des différents espaces sémantiques de Vernadsky, que nous allons pouvoir proposer un complément de terminologie, ou plus exactement un « réajustement sémantique », susceptible d'empêcher toutes nouvelles confusions autour de *La Biosphère*.

5.5.1 L'écosphère, une nouvelle confusion autour de la Biosphère

Il y eut un moment, autour du concept de Biosphère, où les confusions furent telles que certains écologues qui ne s'y retrouvaient pas, et qui avaient besoin de préciser le découpage de leur champ d'étude, emprunteront à Lamont C. Cole un nouveau concept : L'écosphère (Cole, 1958).

Ce concept n'a fait à notre connaissance l'objet que d'un seul article, publié en 1971 dans *Scientific American*, auquel nous n'avons pu avoir accès (Cole, 1958). Mais il fut fort bien analysé dans un article interrogateur : *Ecosphere, biosphere, or Gaia? What to call the global ecosystem ?*, publié par Huggett (1999), qui dit bien ce qu'il veut dire quant à la confusion ambiante.

Nous avons extrait de cet article, puis traduit, l'essentiel des définitions concernant l'Ecosphère de Cole.

Huggett (1999, p. 428) : « *L'intention de Cole en inventant le mot écosphère était de combiner deux concepts : la biosphère et l'écosystème. Il a pris la biosphère pour signifier la totalité des créatures vivantes sur la Terre, créditant Lamarck et Vernadsky de leurs conceptions et développements. Il prit l'écosystème comme une communauté d'organismes (animaux et plantes) ensemble avec leur environnement inorganique. Cette conception lui fut clairement inspirée par l'image de Tansley (1935) d'un écosystème : une communauté d'organismes ensemble avec leur environnement physique. Pour Cole, l'écosphère est l'écosystème global : « la somme totale de la vie sur la Terre ensemble avec l'environnement et les ressources totales de la Terre » (Cole, 1958; p. 84). Le terme de Cole fut réinventé par Gillard (1969), qui le pensa utile pour décrire « cette part de notre sphère dans laquelle il y a la vie ensemble avec les organismes vivants qu'elle contient ». Il fut forcé à cette position parce qu'il avait choisi d'adopter la définition de la biosphère de Teilhard de Chardin, il semblerait largement du fait qu'elle reflétait la définition de Lamarck, qui était antérieure à celle de Vernadsky. Le terme écosphère est utilisé par les écologistes et les biogéographes. Tivy l'a employé dans « *Biogeography : a Study of Plants in the Ecosphere (1982)* ». Commoner (1972) utilise l'idée de l'écosphère comme un cadre dans lequel considérer la « crise environnementale », bien qu'il parla de l'écosphère comme « la maison que la vie a construit pour elle même sur la surface externe de la planète » (1972, p.11), une définition évoquant la biosphère de Hutchinson. »*

Nous constatons ainsi que le « syndrome Gaïa » se reproduira avec Cole, dans les mêmes années 60, transformant du coup en confusion générale ce qui n'était encore que confusions particulières. Ce qui nous confirme combien une traduction anglaise de *La Biosphère* a manqué après guerre aux anglo-saxons.

Faut-il commenter de nouveau ici la nature de cette confusion, dans laquelle c'est maintenant l'écosphère de Cole qui prend la place de Gaïa, qui avait pris celle de la Biosphère ? Nous pensons que notre paragraphe 3.2.4 était suffisamment clair à ce sujet, et on voudra bien s'y reporter.

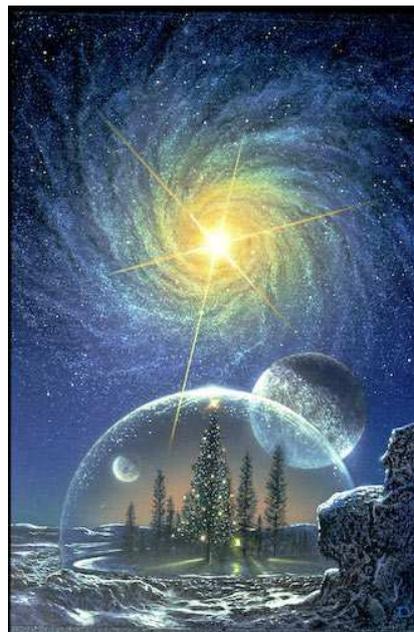
Notons cependant un élément qui ressort des définitions que nous venons de parcourir : l'ignorance du concept de matière « vadoso », ou « bio-inerte » que nous allons étudier dans les pages suivantes. Cette matière « biogène » serait presque le produit essentiel de la biogéochimie comme catégorie de la science, et c'est elle justement qui établit le caractère foncièrement différent de la Biosphère, à la fois du champ thermodynamique de la surface terrestre « brute » originelle, et du champ thermodynamique des « organismes vivants ».

La Biosphère induit notamment une relation dynamique continue entre la matière vivante et son habitat, qu'elle transforma et adapta sans cesse au cours des âges géologiques, en même temps qu'elle s'adapta à lui.

Ceci quand la définition précédente, qui voit : « *l'écosystème comme une communauté d'organismes (animaux et plantes) ensemble avec leur environnement inorganique.* », fait disparaître toutes relations dynamiques, amenant l'environnement des organismes au niveau d'un système totalement « inerte » n'ayant absolument rien à voir avec la Biosphère, ... selon Vernadsky !

Ceci dit, nous retiendrons que Commoner a lui aussi adopté l'idée de « maison de la vie » - ce qui, sauf à la positionner à l'intérieur d'un « domaine de vie », est un signe très encourageant quant au « repositionnement générale » de l' « écosphère » que nous allons maintenant proposer.

5.5.2 L'Ecosphère, « maison » du vivant, « au sein » de la Biosphère



Source : <http://www.cosmographica.com/gallery>

Nous proposons de réajuster le concept d'« **Ecosphère** » (avec, comme pour « Biosphère », une première lettre en majuscule) en l'affectant strictement au « **champ de l'existence vitale** » (champ thermodynamique des organismes vivants), de la Biosphère, selon Vernadsky.

Rejoignant la proposition de Commoner, l'Ecosphère deviendrait de ce fait la « maison du vivant ». Sans plus rien remettre en cause de la Biosphère, elle viendrait au contraire préciser son concept en apportant à la terminologie de Vernadsky un complément fondamental, qu'il rechercha sans cesse, quant à la sphère de développement propre aux « organismes vivants ».

L'Ecosphère représenterait ainsi le lieu spatio-temporel privilégié de développement et d'évolution des espèces à partir des premiers « eucaryotes », quand la Biosphère reste celui des procaryotes depuis la première apparition du vivant. Ceci tout en précisant que la Biosphère

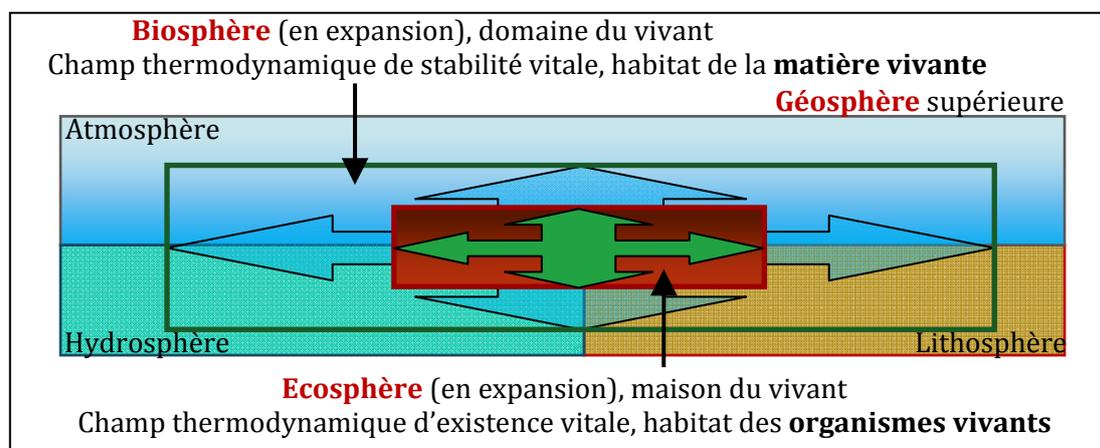
« traverse » l'Ecosphère, mais par une « matière vivante » différenciée au sein de cette dernière, de celle des premiers procaryotes aux origines de sa production.

Ainsi remis à « une juste place », le concept d'Ecosphère constituerait avec la Biosphère un système « métaconceptuel » de découpage tant des habitats (espace) que des étapes d'évolution (temps) des deux grandes formes successives du vivant à l'échelle de la Terre. Il permettrait dans le même temps d'isoler et mettre en exergue le rôle « biogéochimique » très particulier qu'a eu la matière vivante dans la Biosphère, par rapport à la matière géologique inerte de la croûte terrestre originelle.

Il s'agit en effet d'un ensemble de fonctions vitales, que nous allons aborder, parfaitement « différenciables » de celles qu'ont eu les organismes vivants dans leur propre habitat.

Toutes choses qui nous permettent de représenter ainsi ce nouvel ensemble métaconceptuel (vu ici dans une dynamique d'évolution temporelle) :

Figure 21 : L'Ecosphère au sein de la Biosphère



5.6 Fonctions vitales de la Biosphère

5.6.1 Matière vivante et matière biogène

5.6.1.1 Au début « deux » types de matière

Les précédents nous permettent d'aborder maintenant avec plus de sérénité, ce qui ne fut pas toujours le cas, la question de la matière vivante et de sa production.

Vernadsky, (1931, p. 7) : « *La dissymétrie du milieu à la surface terrestre a certes de l'importance au moment de l'apparition de la vie dans le cas seul où la vie est engendrée sur la Terre et n'y a pas pénétré des espaces cosmiques.*

Deux types de matière constituent la biosphère - la matière inerte d'une part et la matière vivante de l'autre. La matière inerte formée enfin de compte de minéraux, demeure immuable en ses manifestations morphologiques c'est à dire par rapport à sa composition chimique et à son état physique. Les mêmes minéraux la formaient à l'ère algonque et avant elle, et la forment aujourd'hui, de nouveaux minéraux n'ont pas apparu à la surface terrestre dans le cours des temps géologiques, si l'on ne compte pas pour tels les minéraux produits par la vie et surtout par la technique humaine.

L'autre partie constitutive de la biosphère - la matière vivante - offre un tout autre phénomène. La matière vivante est éternellement changeante dans son ensemble et en ses parties séparées au cours de l'évolution des espèces. Cette matière vivante est le porteur de l'énergie libre dans les processus géochimiques de la biosphère, elle est sa partie constitutive active. Les formes stables de la matière vivante, telles certaines espèces (nature vivante homogène) de radiolaires, constantes

depuis l'ère algonque, ou *Lingula*⁵² depuis l'ère cambrienne, sont des exceptions. Elles existent dans leur structure permanente des milliards d'années. Toutes les autres ont radicalement changé à travers ces temps, ont subi une évolution. Le monde vivant de la biosphère paléozoïque et celui d'aujourd'hui sont nettement différents. Le monde de la matière brute est demeuré tout ce temps-là le même.⁵³ »

Vernadsky nous parle ici de deux états de la matière, sauf ces « minéraux produits par la vie », qui constitueront en fait un troisième état, la matière « biogène » ou encore « vadoses ».

Ce troisième état est plus que fondamental dans la théorie générale de la biogéochimie, car, résultant des différents processus vitaux de la matière vivante, c'est lui qui va enclencher les grands processus dynamiques de la Biosphère, tels le cycle de l'eau et le cycle des roches, dont notamment le processus d'altération superficielle, grand pivot du premier principe de la biogéochimie.

5.6.1.2 Puis un « troisième type », les minéraux vadoses

Vernadsky, (1931, p. 8) : « *L'immutabilité de la matière brute de la biosphère, de ses minéraux, ne peut être maintenue que sous la condition que la vie qui y est liée avec eux de la manière la plus étroite demeure immuable aussi par certains de ses traits déterminés, essentiels. En se changeant morphologiquement elle doit demeurer immuable dans son effet moyen, dans sa nature complexe, dans ses manifestations, liées avec la formation des minéraux c'est-à-dire en premier lieu dans sa composition chimique quantitative moyenne et dans sa masse moyenne. Elle a dû toujours constituer l'une et même part déterminée de la masse de la biosphère. Car ce n'est que sous cette condition que le phénomène grandiose de la formation de l'enveloppe terrestre de « l'altération superficielle » - toujours le même - qui sous l'influence de la vie se produit sur toute la terre ferme, reste chimiquement et minéralogiquement immuable au cours des temps géologiques. Ce n'est qu'alors que les minéraux formés dans la biosphère - **minéraux vadoses** - demeureraient constants dans leur composition et dans leur paragenèse au cours des temps géologiques.*

5.6.1.3 Et donc « trois » types de matière

Vernadsky caractérise donc bien trois types fondamentaux de matière ou de corps naturels. Ce que l'on vérifie explicitement plus tard, bien qu'il en ait toujours parlé.

Vernadsky (1938, p.25) : « *Il est possible de distinguer trois types de corps naturels dans la Biosphère : les corps vivants (par exemple une plante, un bœuf, etc.), les corps inertes (par exemple la roche, le quartz, etc.), et les corps bio-inertes (comme le sol, l'eau d'un lac, etc.).* »

Laissons de côté la matière inerte qui formait la surface de la Planète originelle, et examinons ce qu'il en est de cette la matière bio-inerte avant de voir le rôle de la matière vivante dans la production de cette matière.

5.6.1.4 Zoom sur les corps vadoses (ou biogènes) et l'altération superficielle

Ces corps bio-inertes représentent la forme tardive chez Vernadsky des minéraux « vadoses », qu'il nommera par ailleurs matière « biogène » quand il les regroupera, sous un autre angle de vue, avec tous les autres états de la matière (de l'atmosphère, de l'hydrosphère et de la lithosphère) transformés par le vivant.

Cette matière vadoso-biogène est « la notion pivot » de la Biosphère, sur laquelle Vernadsky insiste à de nombreuses reprises entre 1922 et 1938. Elle justifie pratiquement à elle seule l'existence de la biogéochimie comme interface entre les sciences physiques et biologiques. Tout en décrivant ses effets, il la définit progressivement ainsi :

⁵² Un des plus anciens brachiopodes (coquillages à deux valves)

⁵³ Vernadsky utilise souvent le terme de « matière brute » pour signifier la matière vadoso et/ou biogènes et/ou bio-inerte que nous allons examiner. On veillera donc à ne pas la confondre avec la matière inerte constitutive de la croûte terrestre originelle.

Vernadsky (1929, p. 162) : « ... nous appellerons vadoses les phénomènes et les corps, liés à la deuxième enveloppe thermodynamique superficielle (la Biosphère). »

Il nous signifie ainsi que ces corps ne sont surtout pas à confondre avec la matière inerte de la croûte formée à l'origine de l'accrétion terrestre, de même qu'avec la matière vivante.

Vernadsky (1922, p.5) : « *L'effet général de l'influence chimique de la matière vivante sur le milieu environnant - sur toute la nature - n'a pas été assez remarqué. Dans les travaux des savants des dernières générations nous ne trouvons aucune généralisation relative à cet effet de la nature organique. Nous ne relevons des indices de ces recherches que chez les anciens naturalistes du XVIIIe siècle, dans les écrits du célèbre membre de l'Académie de Pétersbourg, C. Wolffet, au commencement du XIXe, dans les œuvres du très éminent penseur polonais, le docteur A. Sniadecki. Ces savants ont tenté de voir dans cette extraction d'éléments chimiques déterminés du milieu environnant, par la respiration et la nutrition des organismes, la manifestation de forces spécifiques propres à tout ce qui vit, pour ainsi dire cosmiques, analogues à la gravitation universelle et à l'affinité chimique. Il est certain que ces manifestations de la vie produisent un trouble profond dans les réactions chimiques de l'écorce terrestre. C'est en grande partie grâce à elles que l'histoire géochimique des éléments chimiques est toute autre qu'elle ne l'eût été si la chimie de la surface dépendait seulement de la composition et du champ thermodynamique de cette surface. Nous savons qu'une immense quantité d'éléments chimiques de la biosphère se trouve accaparée, en vertu de ces phénomènes, par la matière vivante et soumise à d'autres processus chimiques que ceux qu'ils auraient subis s'il n'y avait pas eu de vie sur la Terre. Il arrive souvent que la matière vivante attire toute la masse de certains éléments chimiques de la biosphère, comme par exemple L ou P. Pour comprendre l'importance de ce phénomène, il est nécessaire de l'étudier au point de vue quantitatif et non qualitatif.* »

Vernadsky (1922, p.15) : « ... La matière vivante joue un rôle immense dans ce mécanisme. Elle retient dans sa composition, à chaque moment, une quantité déterminée d'atomes des éléments cycliques, égale à $n \times 10^{-2}$ % du poids de l'écorce terrestre; elle absorbe continuellement l'énergie radiante du Soleil et la transforme en processus auxquels est liée la formation de minéraux dans la biosphère. Et en même temps, dans la même partie superficielle de l'écorce terrestre, se trouvent d'autres éléments chimiques qui n'entrent pas dans la composition de la matière vivante, mais dont la désintégration atomique dégage de l'énergie. **Cette énergie reconstitue les composés chimiques primaires, les minéraux, qui avaient été modifiés par la matière vivante.** L'énergie atomique de ces éléments, très radioactifs, n'exige pas plus de $n \times 10^{-1}$ % de toute la matière de l'écorce terrestre. Cette fraction représente le poids de la matière chimiquement active de notre planète. »

Ce grand cycle aboutit dans une première étape à la formation des corps chimiques biogènes de la Biosphère, que l'on peut assimiler aux « déchets » du métabolisme de la matière vivante, produits lors du nettoyage (oxydation/réduction) de la matière inerte toxique de la surface terrestre primitive. Ils sont présents dans toutes les phases matérielles (gazeuses, liquides et solides) et dans toutes les enveloppes de la Biosphère (atmosphère, hydrosphère et lithosphère).

Au cours d'innombrables réactions en chaîne d'oxydation et de réduction, les matières brutes d'origine sont réduites, comme l'hydrogène (H_2), les sulfates FeS_2 ou H_2S , le méthane (CH_4), l'oxyde et le dioxyde de carbone (CO et CO_2), l'eau elle même (H_2O), ou oxydés, comme les sulfates (SO_4), le fer (FeO_2), la silice (SiO_2). A la suite de quoi les déchets de réaction pourront s'échapper hors de l'atmosphère comme l'hydrogène en excès (H_2), serviront à d'autres processus métaboliques, ou seront concentrés et précipités au fond de l'océan, des lacs et zones humides terrestres. D'autres enfin, comme l'oxygène O_2 , deviendront les produits d'entrée, les matières premières des futures générations d'organismes vivants.

Dans une seconde étape du cycle, les minéraux réduits ou oxydés, dans tous les cas concentrés, entreraient dans le processus de subduction à partir duquel ils seraient soit stockés dans les

couches inférieures de la Biosphère (fer, zinc, cuivre, ...), soit participeraient, avec l'énergie radioactive, à la purification progressive des gaz volcaniques réducteurs de l'ère archéenne⁵⁴.

Vernadsky (1922, p.9) : « *Ainsi, tout l'oxygène libre de l'atmosphère, soit la presque totalité de son oxygène, est exclusivement fourni par la matière vivante, car nous ne connaissons pas d'autre mode de dégagement pour l'oxygène libre dans l'écorce terrestre que celui qui a lieu dans les organismes vivants contenant de la chlorophylle durant la synthèse de leur matière organique. Et en même temps nous connaissons des milliers de réactions chimiques dans l'écorce terrestre qui l'absorbent. S'il n'existait pas d'organismes à chlorophylle, tout l'oxygène libre de l'atmosphère aurait depuis longtemps disparu.* »

Vernadsky (1922, p.2) : « *Ainsi nous savons que l'oxygène libre, après avoir passé par une série de composés dans l'écorce terrestre, finit toujours par se dégager de nouveau pour retourner à l'état libre; le phosphore après s'être dégagé sous la forme d'une apatite ($3Ca_3P_2O_8$, etc.), entre successivement dans la composition de minéraux vadoses (formés dans la biosphère) et d'organismes, et finit par s'amasser de nouveau dans les apatites.* »

Vernadsky (1929, p.196) : « *Il est caractéristique que l'oxygène libre nécessaire à la création de l'ozone se forme dans la biosphère seulement par des procédés biochimiques...* »

Vernadsky (1929, p.169) : « *... un grand nombre de molécules renfermées dans le milieu de la biosphère, molécules nécessaires à la vie, sont elles-mêmes le produit de celle-ci, et en son absence, ne se trouveraient pas dans le milieu brut. Tels par exemple l'oxygène libre O_2 en totalité, et en grande partie tous les gaz tels que CO_2 , NH_3 , H_2S , etc. Le rôle de la vie dans la genèse des solutions aqueuses naturelles n'est pas moins important. Or, les phénomènes de l'alimentation et de la respiration sont indissolublement liés à ces solutions aqueuses. C'est l'eau naturelle, et non l'eau chimiquement pure, qui est aussi nécessaire à la vie que l'échange gazeux.* »

5.6.1.5 Corps naturels « bio-inertes », migration des éléments chimiques

Et comme nous l'avons vu, Vernadsky remplacera plus tard le concept de corps vadoses-biogènes par celui de « corps naturels bio-inertes ». Ce dernier concept ajustera et complètera les précédents, en élargissant leur champ d'action et leur impact sur la Biosphère.

La citation suivante, qui fait y référence, élargit considérablement les types de composés chimiques et matériaux concernés par le phénomène. Elle introduit par ailleurs le concept de « migration des éléments chimiques » (des plus petits cycles d'entretien des organismes aux plus grands cycles biogéochimiques), comme élément dynamique du champ de stabilité vitale. Nous aborderons tant que faire se pourra la part de ces cycles propre aux organismes vivants de « premier ordre » dans les paragraphes suivants, puis ceux propres à l'évolution des espèces, organismes vivants de « second ordre », lors de l'étude du second principe.

Vernadsky (1938, p.25-26) : « *Le concept de corps naturel bio-inerte est un nouveau concept - défini en termes biochimiques exacts et distincts des concepts de corps naturel inerte et vivant. Les corps naturels de cette sorte sont clairement présents dans la biosphère et jouent un grand rôle dans son organisation. Les corps bio-inertes sont caractéristiques de la biosphère⁵⁵. Ce sont des structures légalées, **composées simultanément de corps inertes et vivants** (par exemple les sols), dont toutes les propriétés physico-chimiques ont à être ajustées - avec quelquefois de larges corrections - si, en les étudiant, l'activité de la matière vivante en leur sein n'est pas prise en compte.*

⁵⁴ Au début du Protérozoïque (Sidérien), le volcanisme serait devenu moins chaud pour se rapprocher progressivement du type actuel. Les anciens volcans, plutôt sous-marins, étaient réducteurs, c'est à dire qu'ils émettaient des gaz réduits (H_2 , CO , CH_4 et H_2S) capables de fixer l'oxygène (et retarder ainsi, comme « puits de O_2 », l'oxygénation de l'atmosphère). Ils auraient été progressivement remplacés par des volcans continentaux non-réducteurs, qui émettent des gaz oxydés (H_2O , CO_2 et SO_2), qui ne fixent plus l'oxygène (<http://atil.ovh.org/noosphere/precambrien.php>).

⁵⁵ Ce qui nous montre à quel point il différencie, mais sans la nommer, l'Ecosphère, dont les corps « vivants » sont caractéristiques de sa propre sphère.

La migration des éléments chimiques (atomes) joue un grand rôle dans leurs propriétés - très souvent le rôle dominant. Chaque sol est un corps bio-inerte spécifique. V.V. Dokuchayev avait déjà reconnu ceci clairement. L'écrasante majorité des eaux terrestres sont des corps bio-inertes. Il n'existe seulement que des cas isolés dans lesquels la matière vivante ne joue pas en eux un rôle fondamental. Comme par exemple les eaux chaudes volcaniques, qui sont riches en acide sulfurique et chlorhydrique, ou les eaux fortement salines. Néanmoins, même dans la Mer Morte, il y a une matière vivante microbienne, quoiqu'elle ne joue pas un rôle décisif. L'eau de pluie est libre de matière vivante dans ses premiers moments. Toutes les eaux des océans et des mers, des rivières et des lacs, et tous leurs fonds, sont des corps bio-inertes. L'équilibre des gaz, la composition chimique, et les limons de toutes ces eaux - leur chimie - est basiquement déterminée par la matière vivante.

*Le rôle des corps bio-inertes est extraordinaire, et n'a pas encore été proprement pris en compte dans le processus d'organisation de la Biosphère. **Le processus de l'altération** (superficielle) **des roches est un processus bio-inerte**⁵⁶ - un fait qui n'est usuellement pas considéré. Ce contexte, je pense, explique l'arriération de ce domaine de la chimie géologique (l'altération de la croûte terrestre) par rapport au niveau actuel de la connaissance. L'approche biogéochimique devrait contribuer beaucoup à la solution de ce problème. »*

Notons que nous retrouvons ici une fonction de la matière bio-inerte qui nous renvoie à la « qualité biologique » des sols, telle que nous l'avons abordée au paragraphe 2.6.1 de ce cahier, en référence à l'article de synthèse du numéro spécial de l'Inra (Chaussod, 1996). Nous y reviendrons lors de l'étude du second principe.

Ainsi, les masses de matières transformées qui constituent la matière spécifique de la Biosphère peuvent s'avérer considérables, notamment dans les océans et les régions humides terrestres. Au point de s'enfoncer progressivement dans la croûte terrestre, en y apportant l'énergie libre et en agissant sur ses processus géochimiques autonomes.

Vernadsky (1929, p.226-228) : « ... les produits essentiels des processus biochimiques sont, dans les conditions anaérobies, en l'absence d'oxygène libre, non des gaz mais des corps solides ou des corps colloïdaux qui, au cours du temps, se transforment en grande partie en corps solides. Ces régions réunissent toutes les conditions favorables à leur conservation, car les organismes après leur mort, ainsi que leurs restes, échappent vite aux conditions biochimiques habituelles de décomposition et de putréfaction, conditions des processus s'effectuant dans un milieu contenant de l'oxygène libre et transformant une grande partie de leur matière en produits gazeux ; ils ne se consomment pas... les couches inférieures de la boue marine deviennent inanimées et les corps chimiques formés par la vie n'ont pas le temps de se transformer en produits gazeux ou d'entrer dans de nouvelles matières vivantes... Dans les couches dénuées de vie, les débris organiques se modifient d'une autre façon, lentement, se transforment au cours des temps géologiques en minéraux vadoses solides et colloïdaux. Les produits d'une semblable genèse nous entourent de partout. Modifiés par les processus chimiques, ils forment au cours des temps sous l'aspect de roches sédimentaires, les parties supérieures de la planète, atteignent une épaisseur moyenne de quelques kilomètres. Ces produits transportent dans ces régions de la planète l'énergie libre, transformée par la vie en énergie chimique, que l'organisme vert avait captée jadis dans la biosphère sous forme de rayonnements cosmiques, de rayons solaires. »

Et il en est ainsi des réserves d'énergie fossile sous toutes leurs formes. Mais de nombreuses autres matières minérales sont aussi concernées par ces processus de transformation. Nous résumerons l'ensemble des fonctions et matériaux concernés dans notre « tableau de synthèse des fonctions vitales de la Biosphère ».

La vie agit ainsi au long des cycles géologiques sur la transformation de la surface planétaire de manière bien plus considérable que nous laisserait le supposer la seule prise en compte de l'évolution des espèces, serait-ce avec leurs habitats (écosystèmes).

Bien avant cette évolution, la matière vivante homogène a mis en œuvre pendant plusieurs milliards d'années la genèse spécifique du domaine de la vie, milieu qui pourra accueillir un jour les organismes vivants autonomes dans leurs habitats.

⁵⁶ Nous noterons que ce processus d'altération superficielle des roches est un processus « entropique », qui va se faire comme tel au profit de la production de matière vivante.

Il apparaîtra ainsi pour Vernadsky que ce n'est pas la vie qui est apparue dans la Biosphère, mais que c'est la vie qui l'a produite de fond en comble.

5.6.2 Fonction biogénique de la matière vivante : les véritables autotrophes

Mais quelle est plus précisément cette matière vivante qui transforma à ce point la surface de la Terre en produisant les corps bio-inertes ?

Vernadsky (1929, pp. 167-168) : « *Les organismes hétérotrophes utilisent pour leur alimentation les composés organiques déjà existants créés par d'autres organismes vivants. Le travail préliminaire des organismes autotrophes est en fin de compte nécessaire à l'existence des hétérotrophes. Leur carbone et leur azote en particulier sont dans une large mesure totalement tirés de la matière vivante.* »

Nous pouvons reconnaître ici le « principe SBVB », qui nécessite pour les organismes hétérotrophes l'existence préalable d'une énergie libre (ou entropie négative).

Mais continuons.

Vernadsky (1929, p. 169) : « *Eu égard à cette action profonde de la vie sur le caractère des corps chimiques de la matière brute dans le milieu de laquelle la vie se manifeste, il importe d'indiquer les limites de l'indépendance des organismes autotrophes par rapport à la vie. On n'a pas le droit d'en tirer cette conclusion logique, très courante, que les organismes autotrophes d'aujourd'hui pourraient exister seuls sur notre planète. Ils ont non seulement toujours été engendrés par des organismes autotrophes pareils à eux-mêmes, mais ils ont puisé les éléments nécessaires à l'existence dans des formes de la matière brute créées antérieurement par les organismes.* »

Les choses se compliquent. Nous voici à priori dans une boucle récursive qui pose la question de la poule et de l'œuf, c'est à dire une situation dans laquelle les autotrophes, que nous considérons aujourd'hui parfaitement « autonomes » de par leur capacité photosynthétique, seraient en réalité liés eux mêmes à d'autres organismes autotrophes. Comment expliquer un tel phénomène ?

Vernadsky (1929, p. 168) : « *Il est certain que la question de la source à laquelle les organismes puisent les corps nécessaires à leur vie est plus complexe qu'il ne paraît au premier abord, mais il semble que le classement proposé par W. Pfeffer corresponde à un fait essentiel de toute la nature vivante. Il n'est pas d'organisme qui ne soit lié, ne fût-ce que partiellement, à la matière brute par sa respiration et son alimentation. La séparation des organismes autotrophes des autres matières vivantes est fondée sur leur indépendance de cette matière, en ce qui concerne tous les éléments chimiques ; ils peuvent les puiser dans tout le milieu ambiant, brut, inanimé.* »

Notons, comme nous l'avons précisé préalablement, que la matière brute dont parle ici Vernadsky est cette matière biogène produite par la matière vivante.

Vernadsky (1929, p. 171) : « *En considérant la notion d'organismes « autotrophes » comme limitée à la biosphère actuelle, on exclut par là même la possibilité d'en tirer les conclusions qu'elle comporte sur le passé de la Terre, et spécialement sur la possibilité d'un commencement de vie sur la Terre sous forme d'organismes autotrophes quelconques. Car il est certain que la présence préalable de produits vitaux dans la biosphère est indispensable à tous les organismes autotrophes existants.* »

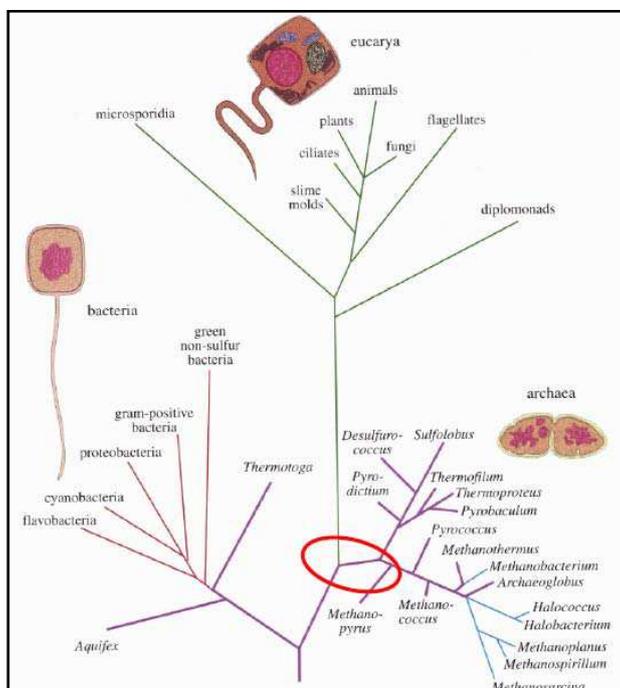
Nous voici de nouveau face à notre énigme d'autotrophes antérieurs aux autotrophes, dont nous avons longtemps cherché la solution. C'est finalement L. Margulis (1986) qui nous l'a donnée.

Il apparaît en fait que Vernadsky définit ici une autotrophie tout à fait différente de la notion actuelle. Ne sont pour lui « réellement autotrophes » que les organismes primitifs qui ont réduit la pollution naturelle représentée par la matière inerte très agressive de la surface originelle de la planète, dans tous ses compartiments de surface, tel que nous l'avons entrevu dans les paragraphes antérieurs.

Tous les autres ne sont au mieux que des semi-autotrophes ou des mixotrophes.

Ces « véritables autotrophes », qui procédèrent tout au long de l'Archéen et du protérozoïque, soit plus de trois milliards d'année, à la « fabrication » de la Biosphère, furent les premiers représentants des deux familles de procaryotes appartenant au domaine des « archaea » (archéobactéries) et des « bacteria » (bactéries), susceptibles de vivre dans des milieux très agressifs, aux pressions et températures très élevées.

Figure 22 : Les trois domaines de l'arbre de vie (Archaea, Bacteria, Eucarya)



Source : F. Selsis, CRAL - ENS Lyon

Parmi ceux-ci, une bactérie, la clostridie, a développé la fonction vitale d'extraction de l'azote atmosphérique et de sa conversion dans la chaîne azotée des acides aminés et des autres composés organiques. Or fixer l'azote demande une énorme quantité d'énergie, entre 6 et 18 molécules d'ATP pour chaque molécule d'azote. Pour mémoire, la fabrication industrielle d'engrais azotés requiert une température d'au moins 500°C sous une pression de 300 bars, conditions qui ressemblent à celle de l'atmosphère des premiers temps qui suivirent l'impact de formation de la Lune (figure 17).

Une autre famille de bactéries au nom plus connu, les cyanobactéries, auraient fait plus tard beaucoup mieux encore. Elles auraient réalisé selon L. Margulis (1986, p. 113), il y a plus de deux milliards d'années, une des révolutions les plus spectaculaires et les plus importantes de l'histoire de la vie. En inventant un système métabolique qui exigeait pour son fonctionnement la substance même qui avait été jusque là un poison mortel, l'oxygène dégagé par la réduction de l'atmosphère primitive. Alors que la fermentation dégageait jusque là deux molécules d'ATP pour une molécule de sucre décomposée, la respiration aérobie de la même molécule de sucre produira désormais jusqu'à trente-six molécules d'ATP.

Mais on ne saurait cependant isoler parmi ces bactéries primitives si efficaces « la » véritable autotrophe qui aurait tout fait toute seule au delà des autres espèces. Elles fonctionnaient comme un corps organisé aux fonctions spécialisées complexes (le microcosme), qui forma la première chaîne trophique de l'histoire de la Terre. Les bactéries transformant la nourriture en déchets et leurs complémentaires, qui transformaient les déchets en nourriture, établissaient des processus cycliques complets produisant et dégageant de l'énergie en boucle, avec une efficacité tendant toujours vers le maximum.

Ce que prédisait Vernadsky dès 1931. Vernadsky, (1931, p. 8) : « *Les manifestations de la vie qui sont liées avec elle, ses fonctions géochimiques, grâce à leur complexité et leur diversité ne peuvent, être l'apanage d'une seule espèce d'organismes. Elles sont incessamment distribuées, à travers toute l'histoire géologique et jusqu'à aujourd'hui, parmi les différentes formes de vie.*

Dans la structure chimique de la biosphère on a affaire au monde vivant dans son ensemble et non à des espèces particulières. Parmi les millions d'espèces il n'y en a pas une qui puisse à elle seule remplir toutes les fonctions géochimiques vitales, qui depuis le commencement existent dans la biosphère. Ainsi la composition morphologique du monde vivant dans la biosphère a dû être complexe dès le commencement »

Ces explications de Vernadsky sont aujourd'hui tout à fait compréhensibles, car les exobiologistes et/ou biogéochimistes modernes rendent parfaitement compte de ce fonctionnement en corps organisé complexe, selon Margulis (1986, p.64) en forme de microcosme.

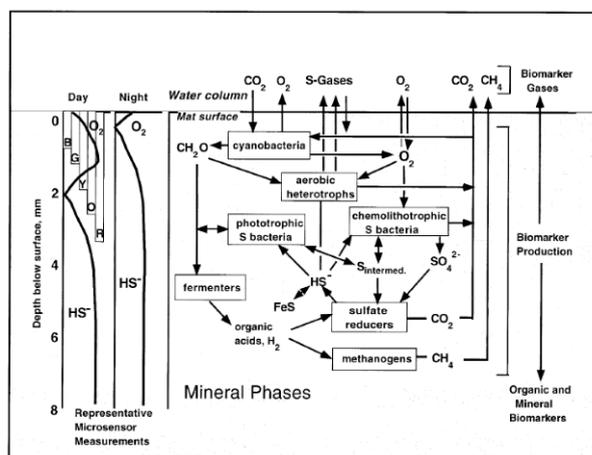
Des Marais nous en donne une très bonne image son article : *Biogeochemistry of Hypersaline Microbial Mats Illustrates the Dynamics of Modern Microbial Ecosystems and the Early Evolution of the Biosphere*.

Résumé de l'article (Des Marais, 2003, p.1) : « Les lits microbiens photosynthétiques sont des écosystèmes auto-entretenus remarquablement complets à l'échelle millimétrique, alors qu'ils ont pourtant substantiellement affecté les processus environnementaux à l'échelle planétaire. Ces tapis pourraient être les descendants directs des plus anciennes communautés biologiques dans lesquelles la photosynthèse oxygénique pourrait s'être développée. Les lits photosynthétiques sont d'excellents laboratoires naturels pour nous aider à apprendre comment les populations microbiennes s'associent pour contrôler les gradients de la dynamique biogéochimique. »

La figure ci-dessous, reprise à cet article, nous résume ainsi l'ensemble complexe des fonctions d'une telle pellicule vitale océanique. Elle illustre parfaitement le fonctionnement de ces colonies microbiennes, décrites par Margulis, que nous aurions vu comme autant de « paquets d'écume gluante de couleur pourpre ou marron ».

Figure et fonctions diversifiées d'un même « microcosme » qui supposent que nous précisions le concept de matière vivante « homogène » pour lui admettre une telle complexité interne de ses organismes spécialisés.

Figure 23 : Ecosystème microbien hypersalin (bio-film) illustrant l'évolution primitive de la Biosphère



Sources : Des Marais, 2003

5.6.3 « Flux » de migration et « stocks » de corps biogènes

5.6.3.1 Migration générale des éléments chimiques, cycle global

Vernadsky (1929, p. 260) : « Nous appellerons **migration générale des éléments chimiques** tout déplacement des éléments chimique, quelle qu'en soit la cause. La migration dans la biosphère peut être déterminée par des processus chimiques, par exemple lors des éruptions volcaniques ; elle est suscitée par le mouvement des masses liquides, solides, gazeuses dans le cas des évaporations et de la formation des dépôts ; elle s'observe à l'occasion du mouvement des fleuves, des courants marins, des vents, des charriages et des déplacements des couches terrestres, etc.

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. Des quantités innombrables d'atomes se trouvent soumis à l'action d'une migration biogène ininterrompue.»

Vernadsky nous parle ici des différents « cycles biogéochimiques » liées à la nature des différents corps naturels bio-inertes, ainsi qu'à l'intensité des courants atomiques d'échange entre les corps et/ou champs thermodynamiques. On distingue parmi ceux-ci des cycles extrêmement longs, comme le cycle des roches, établissant les relations entre la géosphère et la Biosphère, puis d'autres cycles plus courts, comme le cycle de l'eau, établissant les relations entre hydrosphère, atmosphère et lithosphère au sein de la Biosphère, et des cycles de plus en plus courts, jusqu'aux cycles en relation d'échange directe avec les organismes vivants.

Vernadsky (1938, p.24) : « *Entre la matière vivante et inerte de la biosphère, il y a une simple et continue connexion matérielle et énergétique, maintenue en continue durant le processus de respiration, de nourriture et de reproduction de la matière vivante, et nécessaire à sa survie : la migration biogénique des atomes des éléments chimiques, des corps inertes de la biosphère dans les corps naturels vivants et retour. Ceci apparaît sous forme de mouvement - le départ et l'arrivée de composés chimiques spécifiques vers les et venant des organismes vivants en connexion avec les processus d'alimentation, respiration, excrétion, et reproduction, caractéristiques de la matière vivante. Ces processus définissent l'énergie biochimique de la matière vivante, la manifestation principale de laquelle résulte la multiplication de la matière vivante. Toutes les manifestations de la migration biogène et de l'énergie biogéochimique sont déterminées par les dimensions, la composition chimique, et l'énergie de la Biosphère »*

Gardons nous donc de ne voir en ceux-ci que les cycles différenciés de l'eau, de l'azote, du carbone, de l'énergie, etc., auxquels nous sommes aujourd'hui familiarisés. En établissant par sa discipline les liens fondamentaux entre géologie et biologie, Vernadsky conçoit en effet les différents cycles comme autant de flux constituant un cycle global où tous les déchets bio-inertes de la Biosphère participeront directement à sa reproduction et à son expansion, en même temps qu'ils transformeront son milieu d'origine aux fins de sa manifestation la plus complète.

Vernadsky distingue nettement les cycles biogènes de la Terre ferme de ceux des Océans et des surfaces humides.

Vernadsky (1929, pp. 240-241) : « *Les phénomènes géochimiques liés à la pellicule vitale de la Terre ferme sont très caractéristiques et distinguent nettement cette pellicule des pellicules océaniques. Les processus de l'émigration des éléments chimiques hors du cycle vital ne forment jamais dans la pellicule vivante de la Terre ferme des concentrations de minéraux vadoses, semblables aux dépôts marins. »*

Examinons les fonctions les plus significatives de ces flux de migration biogène et les stocks qu'ils constituent dans les différents compartiments de la Biosphère.

5.6.3.2 Flux de migration atmosphérique et terrestre

Vernadsky (1929, p. 241) : « *Après le décès de l'organisme ou l'anéantissement des parties de son corps, la matière qui les composait, ou bien est immédiatement absorbée par de nouveaux organismes, ou bien s'échappe dans l'atmosphère sous forme de produits gazeux. Ces gaz biogènes, O₂, CO₂, H₂O, N₂, NH₃, sont sur-le-champ englobés par l'échange gazeux de la matière vivante. Il s'y établit un équilibre dynamique complet, grâce à l'énorme travail géochimique produit par la matière vivante terrestre, qui ne laisse après des dizaines de millions d'années d'existence, que des traces insignifiantes dans les corps solides qui construisent l'écorce terrestre. Les éléments chimiques de la matière terrestre vitale se trouvent en un mouvement incessant sous forme de gaz et d'organismes vivants. »*

5.6.3.3 Concentrations vitales de la terre ferme (lithosphère)

Vernadsky (1929, p. 242) : « *Les restes organiques vitaux sont pénétrés d'énergie chimique libre dans le champ thermodynamique de la biosphère ; en raison de leurs petites dimensions, ils donnent*

facilement des systèmes aqueux en dispersion, et des solutions colloïdales. Ces restes se concentrent dans les sols de la Terre ferme, qu'on ne peut cependant pas considérer absolument comme une matière brute. La matière vivante y atteint souvent des douzaines de centimètres en poids ; c'est la région où se concentre l'énergie géochimique maxima de la matière vivante, son laboratoire le plus important au point de vue des résultats géochimiques, du développement des processus chimiques et biochimiques qui s'y effectuent. Cette région est par son importance, analogue à celle des vases de la pellicule océanique du fond, mais elle s'en distingue par la prédominance du milieu oxydant : au lieu de quelques millimètres ou de quelques centimètre d'épaisseur dans la vase du fond, ce milieu peut dépasser un mètre dans les sols. Les animaux fousseurs sont ici les facteurs puissants de leur homogénéisation. »

5.6.3.4 Flux de migrations et concentrations vitales des bassins aqueux de la terre ferme

Vernadsky distingue aussi nettement les cycles des bassins aqueux de la terre ferme de ceux de l'hydrosphère.

Vernadsky (1929, p. 245) : « la distinction chimique essentielle est le caractère doux de la masse principale de l'eau ; la distinction physique, c'est le peu de profondeur des bassins. La masse essentielle de l'eau de la terre ferme dans la région de la biosphère est concentrée en flasques, en lacs et en marais, et non en fleuves. Par suite du peu de profondeur des bassins, il ne se forme qu'une seule concentration vitale douce ou saumâtre. Dans les mers d'eau douce seules, par exemple la mer du Baïkal, on observe des pellicules vitales séparées analogues à celles de l'hydrosphère. Mais ces lacs profonds font exception. Le rôle biochimique de ces lacs se distingue nettement de celui des bassins aqueux de l'Océan, ce qui se manifeste en premier lieu dans le fait que les produits de dégagement sont différents dans les bassins d'eau douce. Le premier rang y est tenu par les composés du carbone. Bien que la silice ainsi que les carbonates de calcium et les oxydes hydratés du fer se forment dans les pellicules du fond et les concentrations vitales des bassins de la Terre ferme, ils y tiennent le second rang en comparaison avec le dégagement des corps carbonés. C'est ici seulement que s'effectue à un degré marqué **la formation des corps solides vadoses stables du carbone**, de l'hydrogène et de l'azote, pauvres en oxygène, de tous les charbons de terre et des bitumes. Ce sont les formes stables des minéraux vadoses qui, en quittant la biosphère, passent dans d'autres composés organiques du carbone. Le carbone se dégage sous forme libre de graphite lors de leur transformation finale dans les régions métamorphiques. La cause de la formation de corps carbono-azoteux solides, dans les bassins aqueux (saumâtres ou doux) n'est pas claire, mais il en a toujours été ainsi à travers les temps géologiques. Il n'existe pas d'amas tant soit peu considérables de ces corps dans l'eau de mer et il ne s'en forme jamais dans la chimie de l'océan... Il semble presque certain que c'est dans ces mêmes concentrations d'eau douce ou saumâtres de la terre ferme qu'il faut chercher les sources principales de la formation des grands amas d'hydrocarbures liquides, des pétroles.

5.6.3.5 Flux de migration et concentrations vitales océaniques ...

Vernadsky (1924, pp. 9-10) : « La matière vivante marine composée d'éléments cycliques, matière dont chaque atome prend part à quelque processus cyclique dans l'histoire de la Terre, doit inévitablement se trouver dans l'océan dans un état d'équilibre dynamique stable. L'étude des processus cycliques des différents éléments qui entrent dans la composition de la matière vivante, leur distribution dans la mer et leur corrélation avec la composition de la mer nous donneront un tableau général de la chimie de la mer. La matière vivante est le facteur principal déterminant cette chimie. »

Vernadsky (1929, p.229-230) : « L'Océan, principalement ses régions vitales, ses concentrations littorales et ses concentrations du fond, est le mécanisme formant les agglomérations composées de calcium de la planète, qui n'existent pas dans les parties juvéniles de son écorce, riches en silicium, et dans les régions phréatiques profondes. Il se dégage annuellement au moins 6×10^{14} grammes de calcium à l'état de migration incessante dans le cycle vital de la matière vivante, constituant une partie déjà notable du calcium de l'écorce terrestre... Ces régions de concentration vitale ont une influence analogue sur l'histoire d'autres éléments habituels de l'écorce terrestre, indubitablement sur celle du silicium, de l'aluminium, du fer, du manganèse, du magnésium, du phosphore... dans

l'histoire du silicium, l'influence de la pellicule du fond se manifeste par la formation de dépôts des débris d'organismes, en partie du fond, radiolaires, diatomées, éponges marines. En définitive il s'y forme les plus grandes concentrations connues de silice libre, dont le volume atteint des millions de kilomètres cube. Cette silice libre, inerte et peu sujette et peu sujette aux changements dans la biosphère, est un facteur chimique puissant, un porteur d'énergie chimique libre dans les enveloppes métamorphiques et magmatiques de la terre, en raison de son caractère chimique d'anhydride libre. »

Vernadsky (1929, p.234) : « Deux généralisations empiriques sont indubitables : 1° l'importance de ces dépôts de vase marine, riches en débris organiques, dans l'histoire du **soufre**, du **phosphore**, du **fer**, du **cuivre**, du **plomb**, de **l'argent**, du **nickel**, du **vanadium**, selon toute apparence du **cobalt**, et peut-être dans celle d'autres métaux plus rares...

Vernadsky (1929, p.235) : « Tout indique ... que le fer, le cuivre, le vanadium et peut être d'autres métaux qui s'y trouvent en combinaison avec le soufre, ont été formés par l'altération d'organismes riches en ces métaux. D'autre part, il est très probable que les matières organiques de la vase marine ont la propriété de retenir les métaux, de les concentrer à partir des faibles solutions ; les atomes des métaux eux-mêmes peuvent cependant n'avoir parfois aucun rapport avec la matière vivante. Mais dans un cas comme dans l'autre, ce dégagement de métaux n'aurait pas lieu s'il n'y avait pas de débris de vie, c'est-à-dire si la vase marine n'était pas dans sa partie organique intégrante, un produit de la matière vivante. »

Vernadsky (1929, p. 241) : « Il s'y dépose annuellement (dans les océans) des millions de tonnes de carbonate de calcium et de magnésium (calcaires et calcaires dolomités), de silice (opales, etc.), d'hydrates d'oxyde de fer (limonites), de composés hydratés de manganèse (pyrolusites et psilomelans), de phosphates complexes de calcium (phosphorites), etc. Tous ces corps sont d'origine marine, en tous cas aqueuse. »

Vernadsky (1929, pp.226-227) : « Les concentrations vitales du fond jouent, en rapport avec le caractère de leur matière vivante, un rôle tout à fait particulier dans la biosphère, rôle très important dans la création de sa matière brute. Car les produits essentiels de leurs processus biochimiques sont, dans les conditions anaérobies, en l'absence d'oxygène libre, non des gaz mais des corps solides ou des corps colloïdaux qui, au cours du temps, se transforment en grande partie en corps solides. Ces régions réunissent toutes les conditions favorables à leur conservation, car les organismes après leur mort, ainsi que leurs restes, échappent vite aux conditions biochimiques habituelles de décomposition et de putréfaction, conditions des processus s'effectuant dans un milieu contenant de l'oxygène libre et transformant une grande partie de leur matière en produits gazeux ; ils ne se consomment pas. Non seulement la vie aérobie, mais aussi la vie anaérobie, s'éteint dans la boue marine à une petite profondeur. A mesure que les restes vitaux et les particules de matière brute en suspension tombent d'en haut, les couches inférieures de la boue marine deviennent inanimées et les corps chimiques formés par la vie n'ont pas le temps de se transformer en produits gazeux ou d'entrer dans de nouvelles matières vivantes. ... »

5.6.3.6 ... et cycle des roches

A la suite de quoi, ces concentrations vitales océaniques introduisent le cycle biogéochimique des roches.

Suite de la précédente citation (Vernadsky, 1929, p.227) : « Dans les couches dénuées de vie, les débris organiques se modifient d'une autre façon, lentement, se transforment au cours des temps géologiques en minéraux vadoses et colloïdaux. Les produits d'une semblable genèse nous entourent de partout. Modifiés par les processus chimiques, ils forment au cours des temps sous l'aspect de roches sédimentaires, les parties supérieures de la planète, atteignant une épaisseur moyenne de quelques kilomètres. Ces roches se transforment graduellement en roches métamorphiques, se modifient plus encore, et, pénétrant dans les régions à hautes températures, dans l'enveloppe magmatique de la Terre, entrent dans la composition des roches massives, hypabyssales, de corps phréatiques ou juvéniles, qui rentrent à nouveau avec le temps dans la biosphère sous l'action de l'énergie dont la haute température de ces couches est une manifestation.

Ces produits portent dans ces régions de la planète, l'énergie libre, transformée par la vie en énergie chimique, que l'organisme vert avait captée jadis dans la biosphère sous forme de rayonnements cosmiques, de rayons solaires. »

(Vernadsky, 1924, p.8) : « Les processus cycliques sont étroitement liés aux déplacements géologiques de l'écorce terrestre, par suite desquels la matière, c.-à-d. les éléments chimiques, se déplacent d'une partie de l'écorce terrestre dans l'autre; ces éléments chimiques passent de ses couches supérieures dans les couches plus profondes et inversement.

Toute la matière de l'écorce terrestre est inévitablement entraînée par ce déplacement dans la durée des temps géologiques. A la surface terrestre les éléments chimiques se rassemblent (sur la terre ferme jusqu'à la profondeur de 0,5 - 1,0 kilomètre) dans des formes particulières de minéraux – nommés vadoses... Les minéraux vadoses et les organismes ne sont stables que dans l'enveloppe de l'écorce terrestre ou ils se forment, c.-à-d. dans la biosphère; ils se décomposent dès qu'ils la quittent et se transforment en d'autres corps.

On peut distinguer encore deux autres enveloppes thermodynamiques dans l'écorce terrestre supérieure (jusqu'à 16 km. d'épaisseur) – l'enveloppe métamorphique (aux minéraux phréatiques stables qui s'y forment) et l'enveloppe magmatique (aux minéraux juvéniles stables qui s'y forment).

Le passage des modes de gisements vadoses, phréatiques et juvéniles des uns aux autres caractérise l'éternel processus cyclique dans l'histoire des éléments chimiques cycliques de l'écorce terrestre. Une partie considérable de la matière de l'enveloppe magmatique ne donne pas de composés, – de minéraux, – mais présente une masse fondue ou à demi fondue, pénétrée de gaz, se trouvant sous pression – le magma. »

5.7 Fonctions vitales et cycles biogéochimiques

De toutes ces fonctions de la Biosphère décrites au long de ses ouvrages et article, Vernadsky tirera en 1931, dans un article disponible depuis peu de temps (Vernadsky, 1931), une grande synthèse, à la fois fonctionnelle et théorique. Elle l'amènera à formuler une « ultime » généralisation empirique (dans le cadre de la théorie de la Biosphère) que nous pouvons considérer comme fondatrice du fait de ses multiples répercussions.

Nous présentons ici même une synthèse de cette synthèse.

5.7.1 Tableau de synthèse des fonctions vitales de la Biosphère

D'après : Vernadsky, 1931, p.9

N°	Fonctions	Commentaires de Vernadsky	Eléments	Organismes concernés
1	Production des gaz biogènes	J'ai indiqué depuis longtemps et à plusieurs reprises le trait remarquable qui caractérise la structure de la Terre : tous les gaz de la biosphère y sont liés de la manière la plus étroite avec la vie, se forment en grande partie par voie biogène et échangent de la même manière. Bien que l'on puisse distinguer d'autres fonctions chimiques diverses, l'effet général de la vie dans le régime gazeux de la biosphère est si important qu'il est juste de le rassembler en un bloc unique, comme une fonction indépendante, une partie importante du régime gazeux de la planète.	Production des gaz : N ₂ , O ₂ , CO ₂ , CH ₄ , A ₂ , NH ₃ , H ₂ S, etc.	Tous les organismes
2	Production de l'oxygène libre	Production de l'oxygène libre (par une réduction de CO ₂ , H ₂ O, peut être de nitrates, etc.). Un processus qui est indispensable à l'existence de tous les êtres organisés (outre quelques familles de bactéries) et a une immense portée dans l'histoire géologique du Globe.	Production O ₂	Toutes les plantes à chlorophylle
3	Oxydation	Oxydation des composés chimiques qui peuvent donner plusieurs degrés d'oxydation ou changent facilement - en donnant des produits oxygénés. Il paraît que cette fonction est caractéristique pour tous les éléments multivalents	Oxydation : Fe, Mn, S, Se, Cu, N, C, H, etc.	Bactéries en grande partie autotrophes
4	Production du calcium	Dégagement de calcium sous forme de sels purs (simples et complexes) carbonates, oxalates, phosphates complexes (apatites) etc.	Ca...	Animaux et plantes aqueuses (souvent à chlorophylle), animaux unicellulaires calcifères (foraminifères, etc.), animaux à squelettes calcifères (crustacés, mollusques, échinodermes, coraux, brachiopodes, bryozoaires, vertébrés, etc.). Animaux vertébrés et plantes terrestres, mollusques, mousses (à chlorophylle), etc.
5	Réduction	Nettement exprimée pour les sulfates, production de H ₂ S, FeS ₂ et a ce qu'il paraît d'autres métaux sulfureux biogènes (ZnS, CuS, etc, en partie directement en partie par l'action de H ₂ S biogène).	Réduction : H ₂ S, FeS ₂ , ZnS, CuS, etc.	Bactéries
6	Concentration	Concentration d'éléments déterminés par la matière vivante du milieu ambiant. C'est un phénomène caractéristique pour le carbone, bioélément fondamental et pour beaucoup d'autres éléments. L'importance de la vie sous ce rapport devient de plus en plus nette à mesure de la connaissance plus profonde des processus géochimiques. On peut distinguer ici des espèces d'organismes doués de différentes forces concentratrices. Quelques-uns concentrent plus d'un pour cent du poids vivant (par exemple Si, Fe, K, etc.) - ce sont les organismes siliceux, ferreux, potassiques, etc. Chez d'autres organismes, la quantité des éléments qu'ils renferment dépasse l'abondance moyenne de ceux-ci dans la biosphère (organismes riches en l'élément donné).	Concentration connue pour C, N, Fe, Mn, Cu, Ba, S, J, V K, Na, Si	Organismes, animaux et végétaux, de différentes familles unicellulaires et multicellulaires
7	Combustion de composés organiques	Le fait essentiel de cette fonction est la transformation des composés organiques carbonés de la biosphère, toujours des produits de la vie, en substances gazeuses - H ₂ O, CO ₂ , N ₂ .	Réactions diverses	Bactéries
8	Réduction de composés organiques	Réduction des composés organiques	Production d'autres gaz H ₂ S, CH ₄ , H ₂ , etc.	Bactéries
9	Métabolisme et respiration	Liée avec l'absorption de O ₂ et de H ₂ O, et le dégagement de CO ₂ , suivie d'une intense migration d'éléments chimiques, retenus par les organismes dans la matière vivante même.		Tous les organismes

Commentaires de Vernadsky sur son tableau (1931, p.10) :

« En examinant ce tableau il saute aux yeux,

1) que toutes les fonctions géochimiques de la matière vivante dans la biosphère sans exception peuvent être exécutées par les organismes unicellulaires, protozoaires (unicellulaires eucaryotes)

2) que l'exécution de toutes ces fonctions géochimiques par une seule espèce serait impossible,

3) que dans le cours des temps géologiques un changement de différents organismes qui se remplaçaient les uns les autres dans l'exécution de cette fonction eut lieu, tandis que la fonction elle-même demeurait immuable. Les fonctions géochimiques de la vie sont géologiquement éternelles - forment une partie du mécanisme de la biosphère. »

Commentaires sur le tableau de Vernadsky :

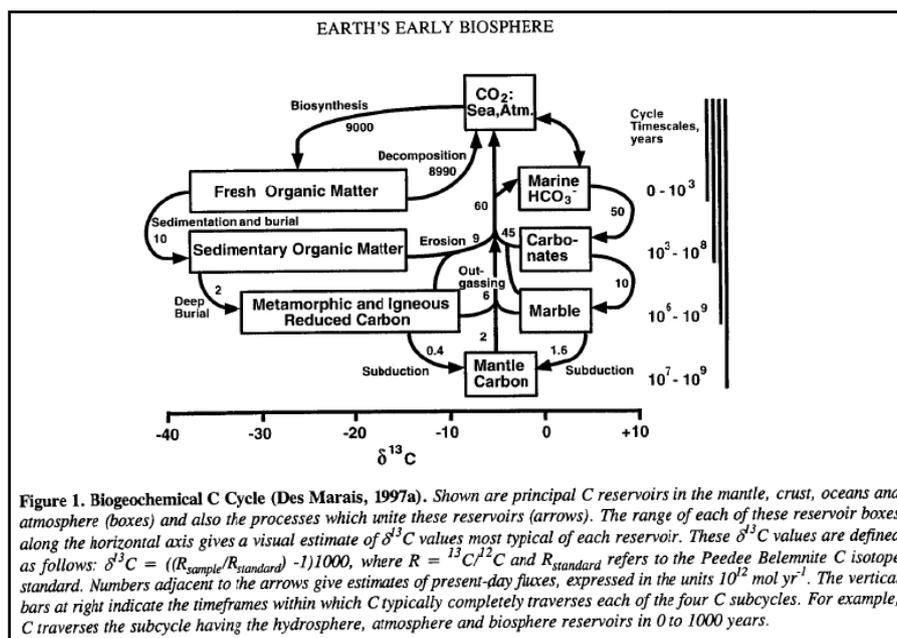
Sauf à avoir fait de petits ajustements de définition pour l'homogénéité des fonctions (nous aurions pu aller plus loin), et sauf à l'avoir présenté en lignes et colonnes, nous avons repris ce tableau tel que nous l'avons trouvé dans l'article de 1931 cité en référence.

Ce tableau comporte un caractère global et transdisciplinaire typique de la « biogéochimie », dont la grande vertu est de nous dresser une synthèse d'ensemble des fonctions de la Biosphère que, selon nos spécialités, soit nous connaissions, soit nous ignorions.

Il devient de ce fait tout à fait pertinent de le comparer à notre regard et/ou notre connaissance actuelle de ces fonctions, relativement aux spécialités et critères propres aux différentes disciplines actuelles s'attachant à l'étude de la Biosphère et de ses populations, en même temps que globalement.

Nous anticiperons ici très brièvement la comparaison de cette synthèse fonctionnelle avec les travaux récents, au moyen de deux schémas très explicites que nous avons repris à Des Marais (1998). Il en ressort que nous formulons aujourd'hui exactement les mêmes concepts que Vernadsky, mais en ayant les moyens de les représenter de manière beaucoup plus « systémique », cette approche n'étant pas « objectivée » (partageable) du temps de Vernadsky, quoi qu'il en avait entièrement formulé tous les aspects dans sa « vision de synthèse » personnelle.

Figure 24 : Synthèse biogéochimique du cycle du carbone



Source : Des Marais, 1998

Figure 25 : Représentation schématique du Bilan de l'oxygène

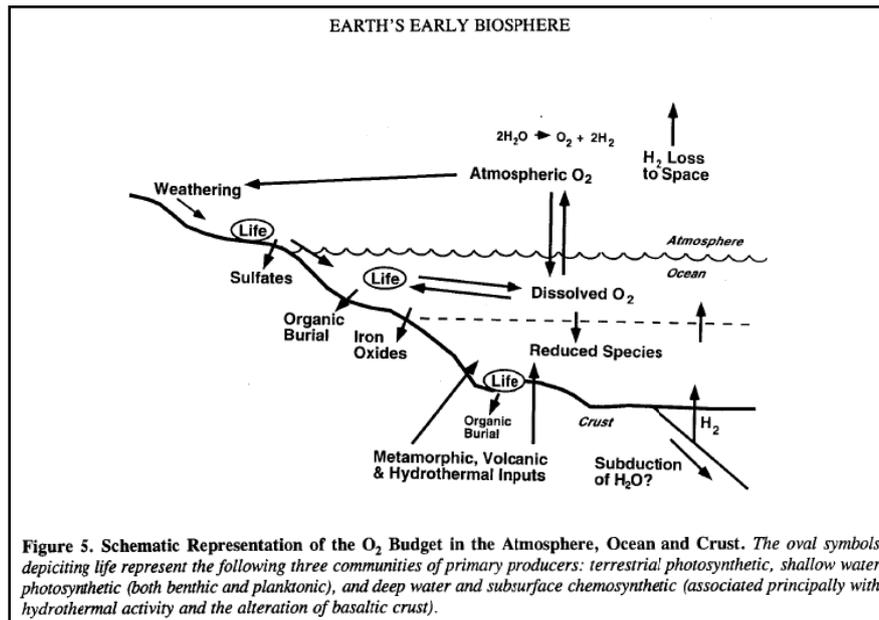


Figure 5. Schematic Representation of the O₂ Budget in the Atmosphere, Ocean and Crust. The oval symbols depicting life represent the following three communities of primary producers: terrestrial photosynthetic, shallow water photosynthetic (both benthic and planktonic), and deep water and subsurface chemosynthetic (associated principally with hydrothermal activity and the alteration of basaltic crust).

Source : Des Marais, 1998

Ceci fait, nous ferons les constats suivants :

- Nous retrouvons dans ce tableau et les commentaires qui l'accompagnent la même difficulté de découpage sémantique, entre matière vivante et organismes autonomes, que nous avons examinée auparavant. Selon que Vernadsky nous parle d'organismes, de bactéries, de végétaux, d'animaux, unicellulaires ou multicellulaires, certaines de ces familles se chevauchent ou se recoupent sans que l'on puisse en tirer un critère pertinent de découpage entre elles. Notons cependant que cet article date de cette même année « 1931 » où il est très probable que de grandes modifications ont du être introduites, « de gré ou de force », dans ses travaux.
- Problème similaire pour le découpage des 9 fonctions. La difficulté de l'exercice est de devoir découper en autant de tranches, d'une part des fonctions complexes en relation dynamique, souvent cycliques, entre enveloppes terrestres, d'autre part des fonctions spécialisées de la chaîne trophiques entre familles d'organismes, et au sein de celles-ci. Ceci comme l'illustrent aujourd'hui les deux figures précédentes ainsi que la figure 23. Dès lors certaines de ces fonctions et types d'organismes se chevauchent et/ou sont redondants.
- Pour la seule production d'oxygène libre, fonction « oh combien » fondamentale dans la création de la Biosphère, Vernadsky apparaît contradictoire entre son tableau, dans lequel ce sont toutes les plantes à chlorophylle qui le produisent (et à priori, si nous le comprenons bien, seulement ces dernières), et son commentaire, dans lequel il apparaît que la « matière vivante » est à même d'effectuer à elle seule toutes les fonctions de la Biosphère, et notamment la production d'oxygène, comme c'est aujourd'hui démontré pour les procaryotes de l'Archéen. Ceci nous montre que de son temps, la différence entre bactéries photosynthétiques et végétaux photosynthétiques ne pouvait être établie, ce qui était générateur d'autant de difficultés de découpage. Toutes choses qui n'empêchèrent pas Vernadsky de faire l'hypothèse de cette différence, comme on le verra dans le paragraphe suivant
- La fonction de production d'énergie libre n'est pas isolée en tant que tel.

Mais nous n'en dirons pas plus et continuerons directement sur le paragraphe faisant suite, dans ce même article, aux commentaires de Vernadsky, et qui établit une généralisation empirique « fondatrice » représentant la grande synthèse paradigmatique d'une formation originelle de la Biosphère par le vivant.

5.7.2 Un « système vivant » créateur de la Biosphère

Vernadsky (1931, p.10) : « *Le résultat, auquel nous sommes arrivés - la généralisation empirique relative à l'existence infaillible dans la biosphère d'une fonction géochimique simultanée et extrêmement variée des représentants de la vie est la condition essentielle, déterminant le caractère de son apparition.*

Quelle que soit cette apparition, elle doit être représentée par un corps vital complexe, non par un ensemble d'individus d'une seule espèce, mais par un ensemble de multiples espèces appartenant morphologiquement à différentes classes d'organismes nettement distinctes, ou à une forme de la matière vivante hypothétique, particulière, différente des espèces linnéennes, forme inconnue de nous. La possibilité de la pleine réalisation de toutes les fonctions géochimiques des organismes dans la biosphère par les organismes unicellulaire rend probable que telle fut effectivement la première apparition de la vie. Car on a le droit de considérer la formation des organismes multicellulaires par la voie de l'évolution des ancêtres unicellulaires comme un phénomène réel.

Si nous connaissons la composition chimique de ces organismes monocellulaires, répondant aux fonctions géochimiques vitales, et si nous avons pu déterminer quantitativement l'importance de chaque fonction biogéochimique dans le mécanisme de la biosphère cela nous aurait donné une idée de la composition chimique de la matière vivante, qui a dû toujours exister dans la biosphère depuis son commencement, et n'a pu changer dans le processus de l'évolution.

Ainsi la première apparition de la vie lors de la genèse de la biosphère a dû se produire non sous forme de quelque espèce unique d'organisme; mais sous forme de leur ensemble, répondant aux fonctions géochimiques vitales. Des biocœnoses ont du apparaître du premier coup...

... La matière vivante primitive devait probablement correspondre à un complexe de formes organisées, unicellulaires et bactérielles. »

Cette généralisation empirique « fondatrice » de Vernadsky nous apparaît particulièrement « remarquable » :

- Par son caractère prédictif des types d'organismes « et » de fonctions systémiques, « différenciés », alors ignorés, constitutifs de la pellicule océanique de l'Archéen. Il nous décrit un corps vital complexe, un « ensemble unique de parties différentes », qu'il conçoit désormais « tout à la fois homogène et hétérogène », et tout à fait tel que Margulis (1986), avec son microcosme, ou Des marais (1998, ...), nous en expliquent et montrent (figures 23 à 25) aujourd'hui les différents aspects.

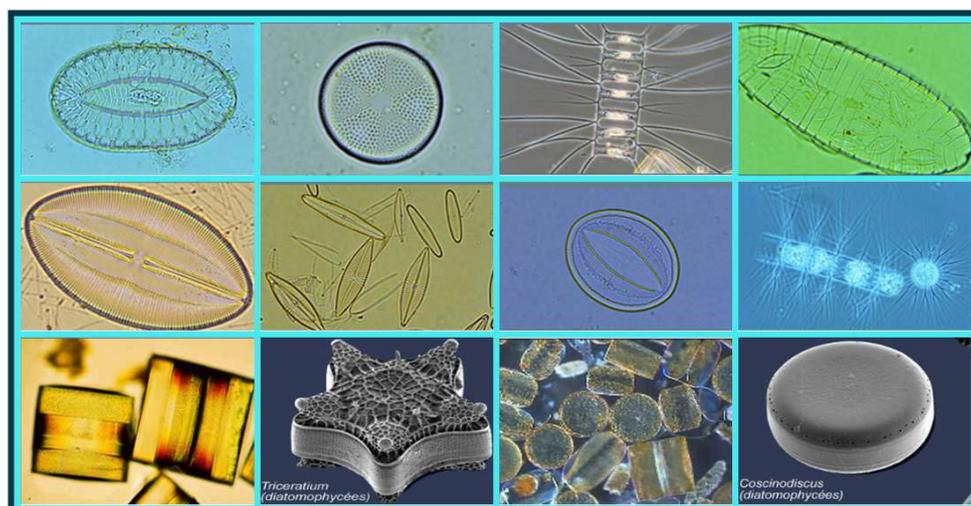
Nous pouvons maintenant comprendre pourquoi Vernadsky hésita tant sur le caractère homogène/hétérogène de la matière vivante, quand il ne disposait pas d'outils systémiques, voire de *La Méthode* d'Edgard Morin (1977), pour décrire un tel « système vivant ».

- Par son caractère prédictif de la découverte de l'« endosymbiose ». Vernadsky déduit effectivement des constats précédents que les organismes multicellulaires ont du apparaître via l'évolution de cette « matière vivante unicellulaire » que forme le corps vital complexe. Il anticipe là une découverte très récente, dans laquelle L. Margulis a joué un rôle important, qui tend à nous démontrer que les cellules des eucaryotes ont été formées par incorporation directe des cellules bactériennes photosynthétiques et oxydantes (autotrophes et hétérotrophes) de la Biosphère originelle.

Nous verrons lors de notre étude du second principe (cahier N°2) que cette étape cruciale de l'évolution des espèces, où la cellule à noyau naîtra par incorporation des bactéries (cellules sans noyau), a vocation à jouer le rôle de frontière spatio-temporelle entre la Biosphère et l'Ecosphère.

Nous pouvons constater aujourd'hui cette évolution quand nous comparons les bio-films de type archéen étudiés par Des Marais, avec le phytoplancton où des eucaryotes photosynthétiques comme les diatomées interviennent en relais direct des procaryotes photosynthétiques (cyanobactéries, ...).

Figure 26 : Quelques cyanobactéries et diatomées du phytoplancton



Source : Loiret 2011, d'après différentes sources

- Et enfin par son caractère « déductif » d'une première apparition de la vie en forme d'un tapis bactérien (bactéries ou archées ?) originel, aux fonctions très rapidement différenciées susceptibles d'accomplir « ensemble » les premières fonctions vitales de la Biosphère. Une forme première de la vie qui n'a été à notre connaissance ni découverte ni démontrée, mais qu'il y aurait tout intérêt à étudier vues toutes les généralisations empiriques à ce jour vérifiées de Vernadsky.

5.7.3 Une vision globale des cycles biogéochimiques

Nous terminerons cette synthèse des fonctions vitales de la Biosphère en les rapportant à une vision globale des cycles biogéochimiques que nous proposent Falkowski et al., notamment leur article : *The Microbial Engines That Drive Earth's Biogeochemical Cycles* (Falkowski et al., 2008a).

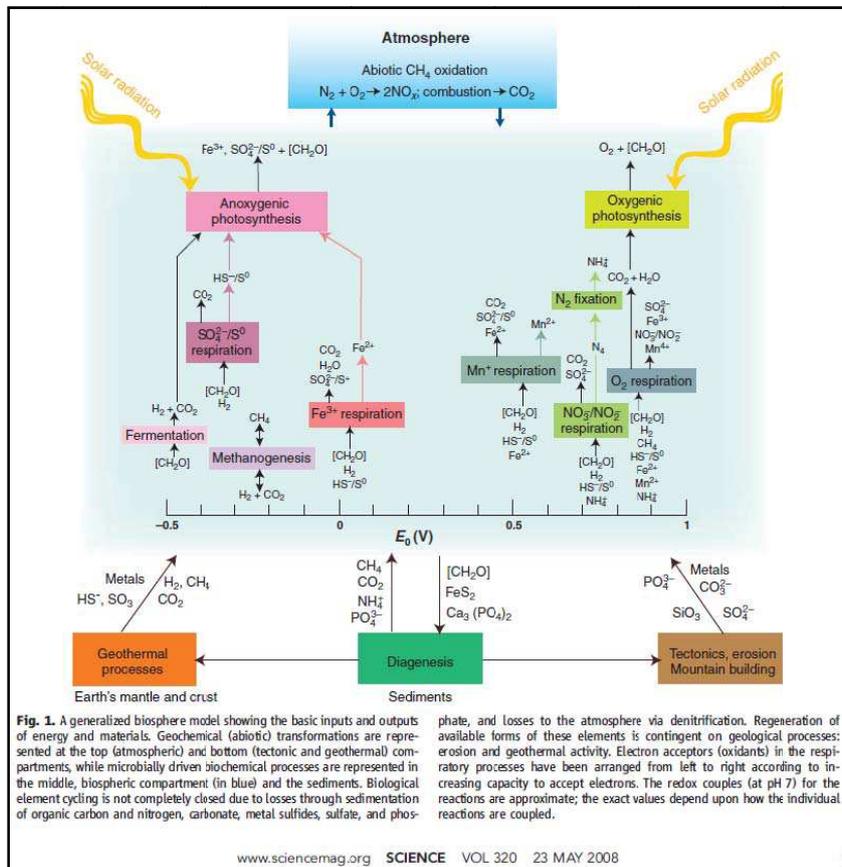
Se positionnant eux-mêmes dans la lignée des travaux de Vernadsky, ils y font état de l'identification d'un ensemble de « machines nanobiologiques » présentes dans les protéines complexes des premiers microbes, et entièrement conservées dans leurs gènes malgré leur très haute antiquité, en même temps qu'elles ont « co-évolué » avec les cycles biogéochimiques. Ces gènes formeraient une boîte à outil complète pour aborder l'ensemble des réactions redox (réduction et oxydation) essentielles à la vie et aux cycles biogéochimiques. Un challenge majeur des prochaines décennies serait selon nos auteurs de comprendre comment ces machines ont évolué, comment elles travaillent, et de comprendre le processus qui contrôle leur activité aux échelles « à la fois moléculaires et planétaires ».

Référons nous en effet à cette citation de Vernadsky (1931, p.10) : « *Si nous connaissions la composition chimique de ces organismes monocellulaires, répondant aux fonctions géochimiques vitales, et si nous avons pu déterminer quantitativement l'importance de chaque fonction biogéochimique dans le mécanisme de la biosphère cela nous aurait donné une idée de la composition chimique de la matière vivante, qui a dû toujours exister dans la biosphère depuis son commencement, et n'a pu changer dans le processus de l'évolution.* »

Il nous semble que les travaux envisagés dans cet article constituent une application directe d'une telle citation, qui suggérerait une « homothétie » de fonctionnement entre les cycles d'échange moléculaires de ces bactéries et les grands cycles de la Biosphère. Ces cycles d'échange moléculaires représenteraient ainsi un « modèle réduit » du fonctionnement des cycles biogéochimiques de la Biosphère. Ce qui en soi est cohérent, car ces bactéries ont généré ces cycles, ce ne peut être que grâce à leur nano machines.

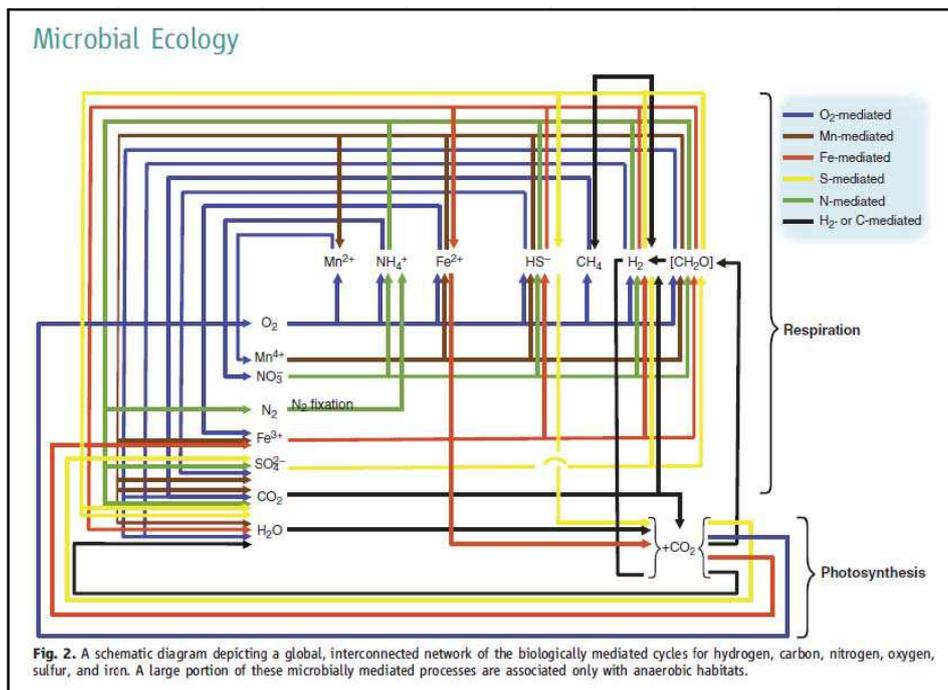
Ces auteurs nous présenteront dans le cours de leur article deux schémas de synthèse des types de réactions redox et de médiations biologiques qui établissent cette relation organique entre fonctions bactériennes et grands cycles de la Biosphère.

Figure 27 : Modèle généralisé des transformations cycliques de la Biosphère



Source : Falkowski et al. 2008 (a)

Figure 28 : Diagramme schématique du réseau de médiations biologiques des cycles de la Biosphère



Source : Falkowski et al. 2008 (a)

5.8 Interprétation thermodynamique du premier principe

5.8.1 Introduction

5.8.1.1 La source de toute valeur

Tout au long du XXe siècle, les chercheurs semblent avoir eu de grandes difficultés, y compris Vernadsky comme nous l'avons vu, à établir la cohérence entre deux découpages sémantiques différents mais contigus des organismes vivants dans la chaîne de l'évolution, qui reflètent chacun une réalité biologique complexe observée à partir de points de vue différents :

- Autotrophes et hétérotrophes
- Procaryotes (tapis bactériens) et eucaryotes (organismes autonomes)

Et ce n'est que récemment que l'on a compris (les biogéochimistes en premier semble-t-il) que procaryotes et eucaryotes constituaient en fait deux chaînes trophiques différentes, comprenant chacune leurs autotrophes et leurs hétérotrophes.

La découverte du processus de l'endosymbiose (Margulis, 1986), pourrait avoir joué un rôle important dans cette différenciation des deux chaînes, car on a alors compris que les anciennes bactéries réductrices (photosynthèse autotrophique) et oxydantes (respiration hétérotrophe), étaient toutes deux incorporées symbiotiquement dans le protoplasme de la cellule à noyau des eucaryotes végétaux, procurant ainsi à ces derniers la double capacité de réduction et oxydation.

Ce qui montrait bien que les procaryotes autotrophes et hétérotrophes avaient fonctionné en interrelation étroite pendant des centaines de millions d'années pour exercer une même fonction globale d'épuration du milieu planétaire originel. Fonction globale de réduction et oxydation de très multiples molécules agressives, qui nécessitait de très fortes capacités d'adaptation (les procaryotes échangent leurs gènes très facilement) et de multiplication (division cellulaire), que seule une chaîne trophique polyfonctionnelle, comme le microcosme bactérien selon Margulis pouvait exercer.

Nous avons ainsi affaire, entre cette chaîne et l'autre (eucaryotes multicellulaires), à une forme de double évolution des espèces, ou à deux grandes strates de l'évolution des espèces, que Vernadsky avait bien identifiées mais sans avoir alors les moyens d'établir un découpage sémantique permettant de traduire leur réalité aujourd'hui découverte.

Nous souhaiterions nommer ici ces deux grandes strates de l'évolution « chaîne trophique de premier ordre » (relative à la Biosphère) et « chaîne trophique de second ordre » (relative à l'Ecosphère, telle que nous l'avons repositionnée), ce qui nous permet ainsi de réajuster une terminologie de Vernadsky qui fut malheureusement source d'erreur, quand il nous dit, en cohérence avec la connaissance de l'époque.

Vernadsky (1929, p.167) : « *Les organismes se distribuent en deux groupes nettement distincts, la matière vivante de premier ordre, les organismes autotrophes, indépendants dans leur alimentation des autres organismes, et la matière vivante de second ordre, les organismes hétérotrophes et mixotrophes.* »

Source d'erreur qui dégénéra en incompréhension « totale »⁵⁷ quand il rajoute plus loin.

Vernadsky (1929, p. 169) : « *On n'a pas le droit d'en tirer cette conclusion logique, très courante, que les organismes autotrophes d'aujourd'hui pourraient exister seuls sur notre planète. Ils ont non seulement toujours été engendrés par des organismes autotrophes pareils à eux-mêmes, mais ils ont puisé les éléments nécessaires à l'existence dans des formes de la matière brute créées antérieurement par les organismes.* »

Mots que nous pouvions rapprocher quelque part de notre principe SBVB, car ils pouvaient nous laisser supposer que cette fameuse « néguentropie » était produite « avant » les autotrophes. Mais par quoi alors ?, ce qui, comme dans le jeu de l'Oie, nous ramenait à la case départ.

⁵⁷ Vernadsky avait une fois de plus raison sur le principe, mais le seul décryptage de la confusion établie par des termes impropres à traduire la réalité nous a demandé des centaines d'heures de recouplement et de clarification.

Mais nous n'en sommes plus là. Les fonctions vitales de la Biosphère, générées par cette chaîne trophique de premier ordre, maintenant bien distinguée de celle de l'Ecosphère, nous expliquent désormais :

- ce sur quoi Bonsack s'interrogeait avec tant de perplexité (comment furent constitués les stocks de néguentropie ?),
- ce que Schrödinger ramenait à une évidence naïve (*Celles-ci (les plantes) bien entendu, reçoivent de la lumière solaire leur puissante provision « d'entropie négative »*),
- et ce que Von Bertalanffy identifiait comme un problème insoluble en l'état des connaissances d'alors.

Car nous savons maintenant que la néguentropie « première », y compris celle du milieu, est entièrement produite par la chaîne trophique de « premier » ordre, dans le champ thermodynamique « primaire » de la Biosphère. Chaîne trophique qui sera ensuite confortée par celle de l'Ecosphère, qui, à la production néguentropique apportera en sus la biodiversité, qui, nous le savons aussi maintenant, optimise le rendement néguentropique de la Biosphère.

Deux chaînes qui de ce fait deviennent « **la source de toute valeur** ».

5.8.1.2 La coproduction entropie ☒ néguentropie

Les systèmes vivants, vus comme un ensemble (chaînes trophiques de premier et second ordre), ou au seul titre de la formation de la Biosphère, introduisent de ce fait une « révision fondamentale » dans la thermodynamique des processus irréversibles et des systèmes ouverts, telle que Von Bertalanffy la formulait, en toute cohérence avec Prigogine.

Von Bertalanffy (1973, p. 39) : « *Mais, 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. Cependant, dans les systèmes ouverts, il n'y a pas seulement production d'entropie par des processus irréversibles mais aussi une importation d'entropie qui peut très bien être négative. C'est le cas de l'organisme vivant qui reçoit des molécules complexes chargées d'énergie libre. Ainsi les systèmes vivants maintenus en état stable peuvent-ils éviter l'accroissement d'entropie ; ils peuvent même évoluer vers des états d'ordre et d'organisation accrus.* ».

Révision fondamentale certes, car elle introduit un principe contradictoire au concept de variation d'entropie toujours positive ci-dessus énoncé.

Mais révision qui pour autant ne remet pas en cause les principes généraux des systèmes ouverts et de la théorie des structures dissipatives.

Car cette révision introduit le concept d'une boucle récursive de « coévolution » positive entre les structures dissipatives et les organismes vivants⁵⁸.

Vernadsky a en effet montré qu'il existait une boucle récursive (un jeu à somme positive ?) de coproduction entropie ☒ néguentropie que nous nous proposons maintenant d'examiner.

⁵⁸ Organismes vivants que par opposition aux structures « dissipatives », nous pourrions nommer des structures « créatives ».

5.8.2 Reprise du premier principe

Reprenons depuis le début. Nous comprenons, au regard des figures 17 et 18, et un peu à l'image de la représentation qui suit, que la surface terrestre, tout au long de l'accrétion planétaire, de la formation de la lune et du brisement de symétrie d'espace qui lui succéda, puis de la période de refroidissement ultérieure qui précéda la grande glaciation, a été le lieu de quantités de phénomènes dissipatifs de très grande ampleur (impacts de météorites, petits et grands, explosions volcaniques cataclysmiques, chaleur infernale, vapeurs sulfureuses, ...). Nous serions ici dans une forme de « chaos moléculaire » selon l'expression de Prigogine, une ouverture « première » de la Terre des origines.



Source : <http://www.cosmographica.com/gallery>

Nous comprenons aussi que la grande glaciation (-83°) qui aurait suivi l'impact de formation de la Lune, devrait avoir ramené pendant 600 millions d'années la surface terrestre (et ses systèmes dissipatifs avec elle) à un niveau d'immobilité quasi absolue, sauf météorites et éruptions volcanique perturbant ce calme, mais de moins en moins souvent, puisque l'ensemble du système tendait vers un état stationnaire immobile où plus rien ou presque ne se passe, à l'image de la Lune, aujourd'hui. La surface terrestre serait effectivement devenue, à ce moment là, un système de plus en plus fermé...

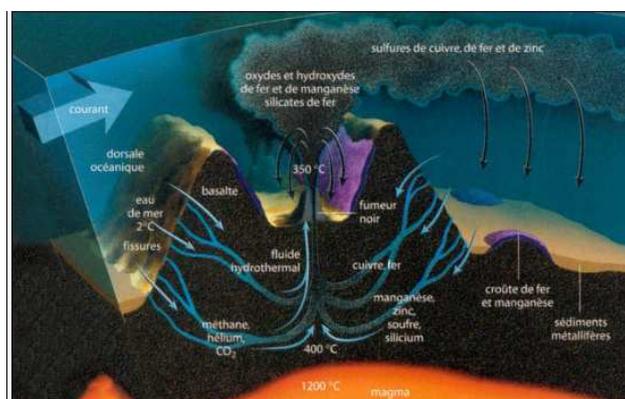
En haut



Source : <http://www.cosmographica.com/gallery>

... sauf pourtant aux profondeurs abyssales non solidifiées de l'océan, aux alentours des fumeurs noirs et/ou cheminées hydrothermales et/ou volcans sous marins, qui continuent (et continuent encore) à faire circuler matière et énergie, et où la température peut atteindre les 400°C et la pression plusieurs centaines de bars.

En bas



Source : <http://vie-dans-les-abysses.e-monsite.com/>

5.8.3 Entropie « positive » proche de zéro et entropie « négative »

Ce qui selon le troisième principe de la thermodynamique (au zéro absolu, l'entropie des solides cristallins purs est égale à zéro), devrait correspondre, pour les surfaces de l'hydrosphère et de la lithosphère entièrement recouvertes de glace (sauf aux alentours des sources hydrothermales et des volcans), à un niveau de très basse entropie générale.

Et ce qui correspond bien aux définitions de production entropique de Prigogine (1968, chapitre 6, paragraphes 5 et 7), selon lesquelles les systèmes fermés (mais aussi ouverts)⁵⁹ ont vocation « à évoluer vers un état stationnaire avec une production d'entropie décroissant vers sa valeur la plus basse compatible avec les contraintes extérieures lorsque cet état stationnaire est atteint ».

Une basse entropie qui n'a cependant absolument rien à voir avec la néguentropie (ou entropie à signe négatif) de l'énergie libre, comme l'ont souligné tout autant Sheldrake (1981, p.69) que Von Bertalanffy (1968, pp.155-156).

Ce qui met le doigt, comme l'ont fait Bailly et Longo (2008, pp. 5-8), sur la différence **profondément significative** entre une « entropie positive » proche de zéro ou nulle ($S^+ \geq 0$), c'est à dire une basse entropie « statique » où, plus on s'approche de zéro, moins il se passe de choses, et une « entropie négative » ($S^- < 0$), productrice de travail « dynamique » où le vivant commence à ordonner les choses tout autrement que ces « systèmes d'équilibre mécaniques » mis en exergue par Vernadsky (voir plus bas sa citation de 1929, p. 263).

5.8.4 Séparation néguentropique des états de la matière, du démon au vivant

Car cette température a ensuite progressivement remonté pour se « stabiliser » (figure 18). La Terre (ou plutôt sa surface) « s'ouvrait », mais d'une manière très différente des temps de son accréation, où seuls des « phénomènes » dissipatifs, intempestifs, non structurés, non organisés, non producteurs d'ordre (à la différence des « structures » dissipatives), étaient en jeu.

La Biosphère émergente aurait alors connu, après la « première » dissymétrie, et en même temps que la stabilisation progressive du niveau d'oxygène et de la phase liquide de l'eau, bien d'autres séparations dissymétriques⁶⁰ des états thermodynamiques et matériels de ses compartiments (atmosphère, hydrosphère, lithosphère), bien d'autres concentrations moléculaires. Ce que nous pouvons assimiler à une « organisation différentielle » de ses

⁵⁹ La Terre était-elle dans ces moments là plutôt un système fermé ou plutôt un système ouvert ? Il semblerait qu'elle ait été alors comme le verre d'eau, à moitié plein et à moitié vide.

⁶⁰ La dissymétrie provoque une division en états non homogènes, ce qui, selon la thermodynamique, suppose un niveau d'improbabilité qui éloigne d'autant de l'entropie, qui ramène tout à un ordre homogène fortement probable.

compartiments thermodynamiques, qui aurait succédé aux deux états originels successifs (chaos à très haute entropie et glaciation à très basse entropie).

Processus de « séparation des états » pour lesquels Prigogine nous dit (1968, p. 96) : « *L'entropie de l'état stationnaire est plus petite que celle de l'état initial. Ce résultat reste vrai pour l'effusion thermique ou la diffusion thermique. Dans tous ces exemples la séparation de matière lorsqu'elle est accomplie correspond à une décroissance de l'entropie comparée à l'état initial uniforme.* »

Une séparation dont la mise en œuvre provenait forcément d'une source néguentropique.

De tels états différenciés correspondent parfaitement en effet aux résultats du « travail néguentropique de séparation » de ce fameux démon, dans le petit récipient imaginé par Maxwell.

5.8.5 Activation de systèmes dissipatifs, au delà de l'équilibre

Ces états différenciés de compartiments, de pression, de température et de taux d'humidité, mais aussi ces états concentrés de l'oxygène, de l'eau et de bien d'autres molécules, auraient ainsi induit en boucle, au delà des sources volcaniques existantes, la montée en puissance et la stabilisation de multiples phénomènes de convection produisant autant de flux d'échanges énergétiques, matériels, chimiques entre compartiments solides, liquides et gazeux de la Biosphère, permettant d'autant en retour la différenciation des états.

De nouvelles structures dynamiques seraient ainsi apparues comme autant de systèmes dissipatifs⁶¹ (courants aériens secs et humides, nuages, pluies, tempêtes, cyclones, ...), liés à la stabilisation climatique, aux débuts du cycle de l'eau et des autres cycles matériels,...



Source : <http://www.cosmographica.com/gallery>

Souvenons-nous ici de Prigogine.

Prigogine (1993, p. 29) : « *Si maintenant **nous ouvrons le système** et que nous permettons à des flux d'énergie et de matière de pénétrer dans le système, la situation change radicalement. D'un côté, à l'échelle macroscopique, nous avons des phénomènes irréversibles, flux de chaleur, réactions chimiques, qui conduisent à de **nouvelles structures spatio-temporelles impossibles à réaliser à l'équilibre**. D'un autre côté, le chaos moléculaire s'organise et donne lieu à des brisements de symétrie temporelle, à des brisements de symétrie d'espace.* »

Ce qui nous confirme bien que la Biosphère ne saurait être un système fermé à l'équilibre, sans quoi aucun phénomène ou structure dissipatif n'aurait jamais pu apparaître sur la surface terrestre. La surface terrestre s'est donc progressivement ouverte pour évoluer vers l'état stable.

Ce qui ne saurait être sans apport d'énergie libre, seule produite par le vivant !

Tous ces phénomènes étaient donc conditionnés, à ce stade de l'évolution, par l'émergence du vivant. C'est à dire par ce phénomène biogéochimique, à priori incompréhensible, d'émergence

⁶¹ Le « système » dissipatif prend ici un caractère plus général et fluide que la structure dissipative, qui suppose des phénomènes de convection très importants et relativement stabilisés, tels que les tourbillons d'eau, les cyclones, ...

de la Biosphère par activation progressive, sur des millions d'années, d'une boucle récursive d'adaptation entre la matière vivante et le système physique de la planète originelle.

Une coévolution de la Biosphère et de la matière vivante que Vernadsky cherche à nous expliquer tout au long de son très abrupt mais fascinant ouvrage.

Phénomène d'apparition de la Biosphère que l'on peut finalement assimiler à la montée en puissance d'une « organisation » dynamique des compartiments, des états et des cycles d'échanges sur la surface terrestre originelle.

5.8.6 Organisation néguentropique de la Biosphère et cycles dissipatifs

Organisation néguentropique interne d'un système ouvert qui comme nous le savons est toujours liée à une source extérieure de néguentropie.

Et organisation, dynamique, qui dans ce cas « sépara » états chimiques et états thermodynamiques de basse et haute entropie, à l'exemple de la séparation, dans l'hydrosphère, des glaces de l'antarctique et des masses d'eau chaudes de l'équateur.

Ce qui suppose, encore une fois, de « noter » la différence essentielle entre l'ordre complètement inerte de la basse entropie (3ème principe), le désordre chaotique de la haute entropie, et la néguentropie « organisatrice » de la matière vivante qui produit du travail par « séparation » des sources froides et chaudes, des états chimiques, ...

Organisation du travail qui sera d'autant plus efficace qu'une source stabilisée de néguentropie reproduit « stablement » la séparation continue des différents états thermodynamiques et chimiques. Ceci à la différence du chaos de haute entropie qui mélange tout jusqu'à l'« indifférence », ou de l'ordre basement entropique qui fige tout autour de lui !

Car cette organisation, stabilisant l'instabilité, stabilisera la séparation hétérogène et dissymétrique des états entropiques de la Biosphère, permettant de ce fait, grâce aux différents cycles biogéochimiques, la variabilité constante et régulière de leurs très multiples échanges réciproques.

Cycles qui pourraient donc avoir quelques similitudes avec les structures dissipatives de Prigogine, ne serait-ce que la leur caractère d'« instabilités stabilisées ». Pourrait-on de ce fait parler de « cycles dissipatifs » ?

5.8.7 Flux solaires ou énergie libre ?

Or la source néguentropique de cette organisation ne pourrait en aucun cas être fournie par la seule source énergétique solaire. Sauf variation de la température d'équilibre de la terre, les flux d'énergie solaire demeureraient en effet inopérants sans la présence des compartiments différenciés de la Biosphère.

Que deviendraient-ils en effet sans ces compartiments ? Comment pourraient-ils entretenir les cycles climatiques sans les états dissymétriques séparés de la Biosphère, sans les différences de pression et de température (états entropiques) des strates de l'atmosphère et de l'hydrosphère, sans leurs capacités de stockage thermique (enthalpie) établissant des masses thermique donnant autant d'inertie permettant la stabilité réciproque de leurs différents états ?

Et de telles capacités de stockage de l'atmosphère et de la lithosphère, de basse entropie d'une part (arctique-antarctique, grêle), de haute entropie de l'autre (vapeurs de l'atmosphère et eaux chaudes de l'océan), pourraient-elles exister sans la séparation dissymétrique des différents états chimiques et thermodynamiques produits par le vivant ?

Que pourrait faire la seule énergie solaire sans une telle organisation stabilisée ? Qu'advient-il d'ailleurs sur la Lune, tout aussi inondée de soleil que la Terre ?

Nous le savons bien : « *L'atmosphère de la Lune est très ténue, avec seulement quelques traces de gaz rares comme l'argon, le néon ou l'hélium... Cette absence d'atmosphère est responsable d'une très grande amplitude thermique : la température passe de -170 degrés Celsius sur la face nocturne à 120 degrés Celsius sur la face exposée au Soleil.* » (<http://www.astronomes.com/le-systeme-solaire-interne/la-surface-de-la-lune/>)

Quand cette organisation n'existait pas, la surface terrestre est passée comme nous l'avons vu d'un niveau de très haute entropie (vapeur d'eau à plus de 80%, pressions énormes, températures très au dessus des 100°, etc.) à la très basse entropie qui a suivi.

Reprenons ce que disait Vernadsky (1929, p.104) : « *Il ne peut exister d'organismes sans échange gazeux, sans respiration... On peut toujours juger de l'intensité de la vie par la puissance de l'échange gazeux... Il existe depuis longtemps dans ce domaine, des généralisations empiriques qui n'ont jusqu'à présent que peu attiré l'attention et dont la pensée scientifique n'a pas suffisamment tenu compte. La première de ces généralisations indique que les gaz de la biosphère sont identiques à ceux créés par l'échange gazeux des organismes vivants. **Ce sont ces gaz seuls qui, en quantité notable, existent dans la biosphère** : O_2 , N_2 , CO_2 , H_2O , H_2 , NH_3 . Le fait ne peut être accidentel.* »

Ce qui dit bien qu'il ne pourrait exister de tels gaz dans la Biosphère sans matière vivante, celle-là même qui par ses capacités de stockage d'énergie libre a pu produire toute cette organisation.

5.8.8 La matière vivante, source primaire de néguentropique

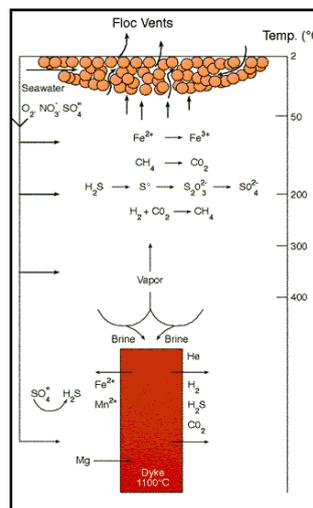
La source néguentropique primaire de cette organisation diversifiée fut ainsi produite par les capacités de réduction-oxydation des toutes premières communautés trophiques bactériennes (coopération entre autotrophes et hétérotrophes).

Communautés aux cycles de réaction très divers selon les milieux (figures 27 et 28), mais qui aboutirent à la production du carbone organique constitutif de leurs cellules vivantes.

Et qui mirent pour cela au point, tantôt la photosynthèse et la respiration « anoxygénique », en milieu dépourvu de lumière et d'énergie solaire mais pourvu d'énergie géothermique.

Ceci à l'exemple des cheminées hydrothermales des profondeurs abyssales.

[Figure 29 : Réactions de réduction et d'oxydation autour d'un fumeur noir](#)



Source : perdue (mille excuses pour son auteur)

Ou tantôt, en milieu éclairé, la photosynthèse « oxygénique », dont le produit envahira un jour la Biosphère, après que tous les « puits d'oxygène » aient été saturés (Kump, 2001).

Le débat ne semble pas tranché quant à la période d'apparition de cette seconde photosynthèse, contemporaine de la précédente ou plus tardive (Kump, 2001). Mais au regard de la grande glaciation de la fin de l'Hadéen, elle aurait pu démarrer, à partir de -3.9 milliards d'années, dans des volumes d'eau libre, maintenus à l'état liquide par des volcans émergeant au dessus de l'océan gelé à une hauteur telle que leurs coulées de lave puissent l'atteindre et entretenir un dégel local durant des périodes suffisamment longues.

Une description qui correspond bien aux atolls du Pacifique, dont le processus de formation (par la matière vivante) a été décrit par Darwin.

Mais nous savons maintenant que nos producteurs de néguentropie n'agissaient pas seuls.

5.8.9 Coproduction matière vivante et systèmes dissipatifs

5.8.9.1 Mécanisme des systèmes dissipatifs

Vernadsky avait déjà de son temps une vision bien formée tant des processus irréversibles que des systèmes dissipatifs d'énergie libre, et ceci dans leur relation aux processus de production néguentropique (énergie géochimique biogène) de la matière vivante. Citons quelques extraits dans lesquels il nous résume son point de vue en la matière.

Vernadsky (1930, p.9) : *« Il n'y avait pas de place pour les processus irréversibles dans les phénomènes physico-chimiques embrassés par la théorie scientifique dans le tableau de l'Univers newtonien, qui avait régné, au début de notre siècle. Tous les processus naturels y étaient toujours considérés de fait comme réversibles. Ce principe constituait la base de la représentation scientifique du Cosmos du XIXème siècle. Dans les cas où ils faisaient l'effet d'être irréversibles, on supposait une irréversibilité apparente, on admettait un développement très lent - jusqu'à l'absurde - du processus réversible, ce qui permettait de se tirer habituellement plus ou moins heureusement des difficultés, créées par l'expérience et l'observation. Les processus irréversibles joueront aujourd'hui un autre rôle dans la physique - rôle probablement très important. Cette admission est d'une grande portée pour les problèmes qui nous occupent. Toutes les conclusions n'en sont pas encore tirées. Il est possible que les processus irréversibles soient dominants dans l'Univers, car ils paraissent constituer l'essence des phénomènes dans la physique moléculaire, dans la physique des phénomènes microscopiques, dans les phénomènes de la chaleur et de l'énergie rayonnante, de la lumière. »*

(Vernadsky, 1929, p.263) : *« Tous ces déplacements des éléments, quelle qu'en soit la cause, répondent à divers systèmes d'équilibres 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. »*

Vernadsky (1924, p. 8-9) : *« L'énergie libre des processus cycliques, une fois le cycle achevé, est égale à zéro, et pendant toute la durée du processus tend vers un minimum. Leurs différents stades présentent des équilibres stables. Un afflux d'énergie extérieure est nécessaire pour renouveler le processus. »*

Vernadsky (1924, p. 8-9) : *« Les processus cycliques naturels – si nous laissons de côté les détails – tirent cette énergie extérieure tant de la surface de l'écorce terrestre, de la biosphère, que des régions métamorphiques et magmatiques. Dans le premier cas, les organismes verts à chlorophylle sont ces porteurs - des accumulateurs amassant et distribuant l'énergie radiante du soleil qu'ils transforment en énergie chimique, et les bactéries inférieures qui utilisent des minéraux vadoses riches en oxygène. »*

Ces différentes explications du fonctionnement des processus cycliques irréversibles, fermés sur eux mêmes (comme les tourbillons d'un fleuve), ressemblent vraiment beaucoup aux définitions des structures dissipatives données par Prigogine. Ces processus « entropiques » représenteraient ainsi la partie dynamique du système d'organisation de la Biosphère, dont la fonction essentielle, à ce titre, serait de soutenir les échanges chimiques entretenant la production « néguentropique » de la matière vivante.

Vernadsky donnerait ainsi corps à cette citation de Prigogine et Stengers (1979, pp. 215-216) : *« Dans ce contexte, un phénomène tel que l'apparition de formes vivantes pourrait être considéré comme prévisible du point de vue de la théorie physique. La vie échapperait certes au principe d'ordre de Boltzmann, mais elle entrerait dans l'ordre des possibilités impliquées par la thermodynamique loin de l'équilibre. Les cellules de Bénard constituent un premier type de structure dissipative, dont le nom traduit l'association entre l'idée d'ordre et l'idée de gaspillage et fut choisi à dessein pour exprimer un fait fondamentalement nouveau : la dissipation d'énergie et de matière - généralement associée aux idées de perte de rendement et d'évolution vers le désordre - devient, loin de l'équilibre, source d'ordre ; la dissipation est à l'origine de ce qu'on peut bien appeler de nouveaux états de la matière. »*

Ceci sauf à dire d'où provient l'énergie libre dissipée ! Car alors ces processus dissipatifs, ramenés à leurs fonctions cycliques, n'apparaissent plus comme les producteurs de nouveaux états de la matière, mais comme les partenaires mécaniques de la matière vivante, fonctionnant avec elle en coopération étroite, à l'exemple des machines utilisées par l'homme.

Les structures et systèmes dissipatifs seraient ainsi coproduits par la vie en même temps qu'ils coproduiraient avec elle au sein de la Biosphère. Au titre d'un principe de « coévolution » (Grenfell et al., 2008) que Prigogine ne semble pas avoir entrevu. Elles seraient entrées progressivement depuis l'aube des temps géologiques en interaction complexe avec les systèmes vivants pour produire et entretenir avec eux, le système climatique et les cycles géochimiques premiers.

Les structures dissipatives, par définition productrices d'entropie, auraient donc été en quelque sorte apprivoisées, voire domestiquées par les systèmes vivants pour optimiser avec eux leur rendement néguentropique de production d'énergie libre ! La dissipation serait bien dès lors productrice d'ordre, et même coproductrice d'organisation, mais comme une des conditions d'apparition de la vie sur Terre.

5.8.9.2 Coproduction entropie /néguentropie

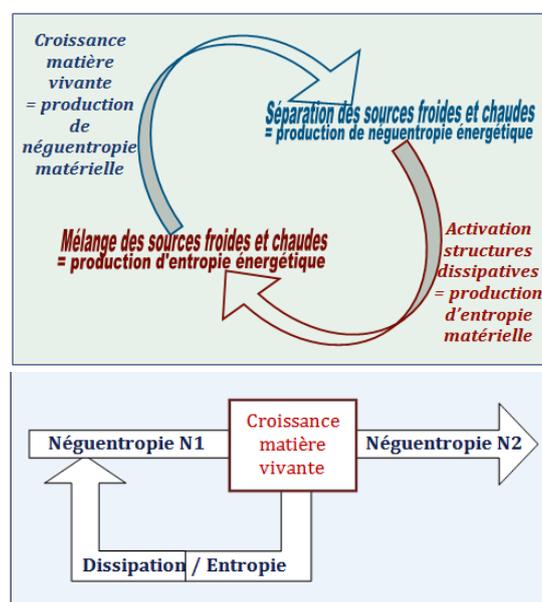
Ce qui ferait dans un tel cadre de l'entropie un paramètre, essentiel, de la production de néguentropie !

Tout comme le refoulement est nécessaires à l'aspiration, dans le mouvement de va et vient « cyclique » d'une pompe, mais dont l'action cumulative croissante irait toujours dans le même sens, la montée en pression néguentropique.

Soit un cycle thermodynamique qui n'irait absolument pas « dans le sens de l'entropie » !

Une boucle récursive ou entropie et néguentropie participeraient ensemble à la production cyclique du vivant, qui en retour augmenterait l'efficacité de leur cycle de coproduction. Ce que nous pouvons tenter de schématiser selon ces deux représentations un peu différentes :

Figure 30 : Coproduction entropie/néguentropie de la matière vivante



Ce qui en soi renouvelle complètement le principe SBVB, selon lequel les organismes vivants produisent leur organisation interne par consommation de néguentropie externe et rejet d'entropie. Ce principe n'est pas faux en soi, il est simplement complété par l'introduction d'une boucle de coproduction entre organismes vivants et structures dissipatives qui permet une croissance continue de la matière vivante et de la néguentropie, depuis les tous premiers autotrophes jusqu'aux derniers hétérotrophes, ...

... sauf l'intervention humaine !

5.8.10 Coproduction entropie / néguentropie : une démonstration mathématique

La Biosphère connaîtrait ainsi dans le contexte des cycles biogéochimiques, des processus dissipatifs de production d'ordre (comme la séparation et le mélange des éléments chimiques) servant les processus néguentropiques de réduction et d'oxydation de la matière vivante, et inversement.

Nous tenterons ici d'en faire une petite démonstration mathématique.

Nous avons étudié toutes les « sorties » de la Biosphère, comme autant de « déchets biogènes » participant à des cycles plus ou moins larges, plus ou moins longs, mais participant tous de son évolution et de son expansion au cours des ères géologiques.

Comme nous l'expliquait Vernadsky, ces flux de matière biogène ont par la suite de très nombreuses destinations, que ce soit dans les enveloppes solides, liquides ou gazeuses de la Biosphère, ou en direction de la géosphère, comme c'est le cas notamment des « corps solides vadoses stables du carbone ».

Vernadsky (1929, p. 245) : *«Le rôle biochimique de ces lacs se distingue nettement de celui des bassins aqueux de l'Océan, ce qui se manifeste en premier lieu dans le fait que les produits de dégagement sont différents dans les bassins d'eau douce. Le premier rang y est tenu par les composés du carbone. Bien que la silice ainsi que les carbonates de calcium et les oxydes hydratés du fer se forment dans les pellicules du fond et les concentrations vitales des bassins de la Terre ferme, ils y tiennent le second rang en comparaison avec le dégagement des corps carbonés. C'est ici seulement que s'effectue à un degré marqué **la formation des corps solides vadoses stables du carbone**, de l'hydrogène et de l'azote, pauvres en oxygène, de tous les charbons de terre et des bitumes. Ce sont les formes stables des minéraux vadoses qui, en quittant la biosphère, passent dans d'autres composés organiques du carbone. Le carbone se dégage sous forme libre de graphite lors de leur transformation finale dans les régions métamorphiques.»*

Notre démonstration consistera dans ce cas spécifique à montrer que tout au long de sa transformation progressive en graphite au sein des enveloppes sédimentaires supérieures puis inférieures de la lithosphère, le carbone végétal, dans le grand cycle matériel enclenché par l'action du vivant, subit l'action de diverses forces dissipatives qui participeront ensemble à la diminution progressive de son entropie par « séparation » et « concentration » progressive des différents composés chimiques.

Ce qui en soit tend à nous démontrer l'existence de ce paradoxe thermodynamique de la Biosphère selon lequel les phénomènes et/ou structures dissipatifs entropiques participent à une transformation néguentropique de la matière bio-inerte.

Ceci sans que nous cherchions à priori à donner une quelconque finalité à ce processus, comme il en est des systèmes vivants selon Von Bertalanffy.

Nous avons retenu dans le tableau ci-dessous un certain nombre de formes du carbone marquant chacune une étape de sa transformation vers la forme libre du graphite, le carbone parfaitement pur.

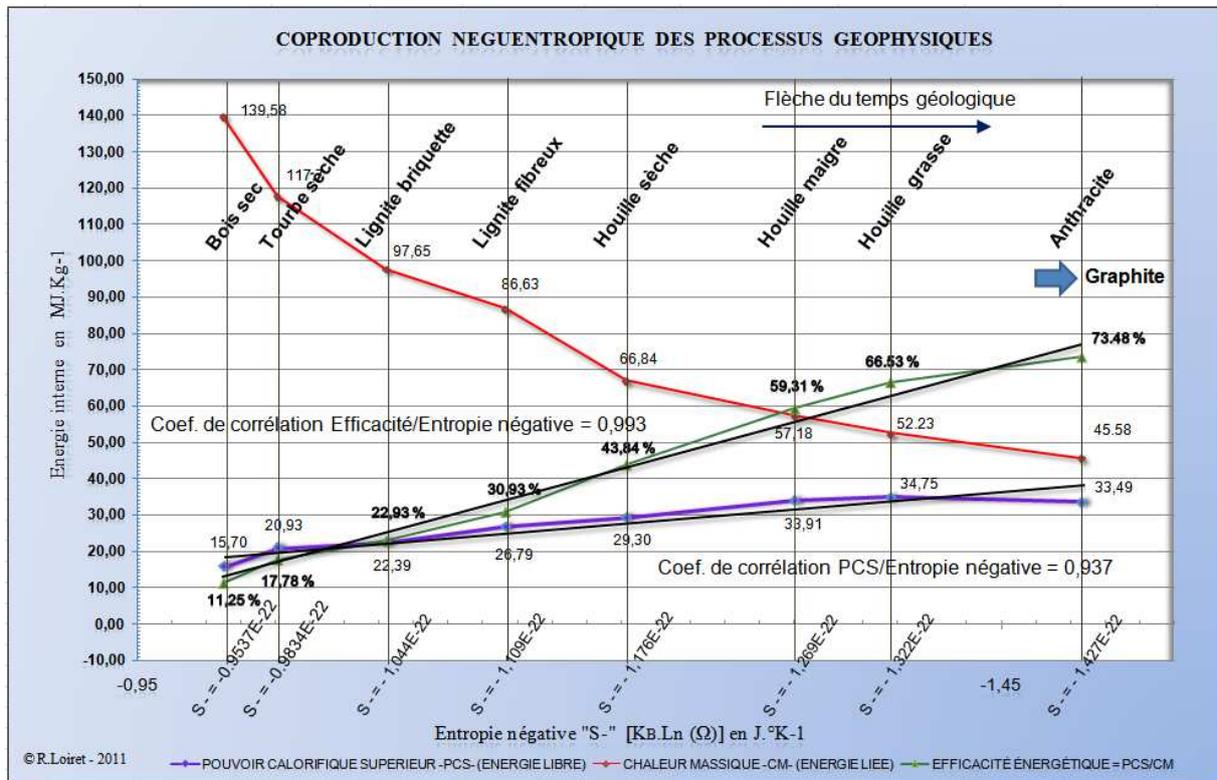
Puis nous avons calculé pour chacune leur « entropie négative ». Nous avons utilisé pour cela la fonction d'entropie de Boltzmann ($S_{+} = -KB \ln(\Omega)$), dont nous avons simplement inversé le signe ($S_{-} = KB \ln(\Omega)$). Nous l'avons calculée à partir de la composition en % de poids sec d'éléments chimiques principaux (carbone, dihydrogène, dioxygène, divers) de chacune de ces formes du carbone, telle que donnée dans différentes tables. Pourcentages qui correspondent à une fonction probabiliste.

Nous avons mis ensuite la progression néguentropique de ces matériaux en corrélation avec :

1/ La progression de leur concentration en énergie libre (ou utile). Cette concentration nous est donnée par le Pouvoir Calorifique Supérieur (PCS), mesuré pour les énergies fossiles par des dispositifs aujourd'hui parfaitement cadrés, et disponible dans différents mémentos d'ingénierie thermique.

2/ La progression de leur efficacité énergétique. Elle nous est donnée par le rapport énergie utile (travail, ici le PCS) sur énergie totale (chaleur, ici la chaleur massique (CM)), soit PCS/CM. On constate que cette efficacité augmente au cours du temps pour passer de 11,25 % à 73,48 %.

Figure 31 : Coproduction néguentropique des processus géophysiques



Commentaires :

Tels que classés dans le graphique, les paramètres des différentes formes du carbone font apparaître ensemble une « ligne temporelle de transformation géologique » de la matière biogène, telle que formulée par Vernadsky, qui met en exergue une augmentation continue d'efficacité énergétique.

Le coefficient de corrélation de cette ligne d'efficacité avec la ligne d'évolution de l'entropie négative est très proche de 1. Ce dont on tire un premier constat : (1) *Il existe une corrélation quasi parfaite entre le rendement en énergie libre du carbone et l'entropie négative.*

Ce qui nous confirme l'équivalence entre l'« énergie géochimique biogène » de Vernadsky (seconde formulation de ses deux principes) et le concept actuel de néguentropie.

On constate par ailleurs que cette efficacité est associée à un processus continu de « dissipation entropique » de la chaleur massique des matériaux « bio-inertes » dans le milieu environnant (la ligne rouge), dont le corollaire est la concentration de leur énergie utile.

Ce dont on tire un second constat remarquable : (2) *Il existerait une flèche du temps « nég » entropique, contraire à celle de l'entropie.*

Ainsi l'efficacité du processus redox de la matière vivante est descendue jusqu'au manteau supérieur, où les conditions thermodynamiques du milieu ont pris le relai du vivant pour opérer, après la réduction originelle du CO₂ une réduction/séparation complémentaire de l'oxygène et de l'eau contenue dans le carbone pour les transférer au manteau (cycle de l'oxygène). Depuis la réduction atmosphérique originelle, en passant par la réduction océanique jusqu'à la réduction lithosphérique, il existerait une flèche du temps néguentropique par laquelle le processus de séparation et de concentration énergétique serait continu à travers toutes les strates de la Biosphère.

5.8.11 La manifestation la plus complète de la Biosphère

5.8.11.1 La Biosphère, structure « gonflable »

Nous aurions donc un cycle de production de néguentropie qui ressemble en bien de ses aspects à ces cycles thermodynamiques producteurs de travail et d'entropie, et à beaucoup des moteurs de nos véhicules. Sauf à fonctionner à l'envers !

Mais profitons de l'image du moteur pour examiner sous un autre angle notre processus néguentropique. 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, toutes 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 gonflable, la matière vivante jouant dans ce cas dans le rôle du compresseur produisant au sens propre du gaz comprimé.

Car la Biosphère est l'habitat de la matière vivante, et comme pour tous les organismes vivants, cet habitat s'élargit au prorata de la croissance de ses habitants, s'emplit de leur respiration, et les imprégnant 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 de son métabolisme, tout en élargissant sa propre masse.

Vernadsky (1929, pp. 80-81) : « *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 le face de la Terre. Il est certains que malgré l'extrême mutabilité de la vie, les phénomènes de sa 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.* »

La matière vivante répond ainsi à un principe de croissance tout au long de laquelle elle produit toujours plus de gaz, lui même en pression croissante. Un processus alternatif de respiration qui augmente la pression interne de la Biosphère, tout comme nous soufflons dans un ballon.

Toutes choses qui ne manquent de nous rappeler la formule « $\frac{pv}{T} = Cte$ » du cycle de Carnot pour un gaz parfait.

Tout comme nos châteaux gonflables ou un simple ballon, la matière vivante aurait ainsi « gonflé » l'atmosphère pour ensuite le maintenir dans un état stationnaire d'équilibre entre des états différenciés.

Mais la pression n'est plus dans ce cas entropique, c'est une « pression néguentropique », comme produit biogène de la matière vivante en croissance, qui maintient en continu les conditions thermodynamiques de l'atmosphère et des autres compartiments de la Biosphère nécessaires à l'expansion de la matière vivante.

Nous constatons ainsi l'existence d'une étonnante boucle vertueuse dans laquelle toutes les fonctions vitales de la Biosphère convergent ensemble vers « **la manifestation la plus complète de la Biosphère** » (premier principe).

5.8.11.2 Schéma de synthèse et bilan thermodynamique du premier principe

Tous les précédents nous autorisent à dessiner le schéma ci-dessous d'un petit modèle systémique de transformation de la surface terrestre et d'expansion dynamique de la Biosphère, au titre du premier principe de Vernadsky.

Nous ne représenterons pas ici l'Ecosphère, objet du second principe. Les flux énergétiques solaires et magmatiques ne seront de même pas représentés pour des raisons de lisibilité.

Dans ce schéma, la matière inerte de la surface originelle traverse en flux cycliques (avec les flux énergétiques) la matière vivante, permettant sa croissance, pour en ressortir sous forme de déchets biogènes formant autant de stocks participant tous de l'expansion de la Biosphère, dans ses divers compartiments (lithosphère, hydrosphère, atmosphère).

L'ensemble matière vivante/Biosphère fonctionnerait comme un vortex à l'envers. Il absorbe la matière inerte (entropique, non séparée) en utilisant, grâce aux cycles dissipatifs, le différentiel de basse/haute entropie (force de travail) des compartiments de la Biosphère à son profit, et en « rechargeant » en retour ce différentiel grâce aux stocks biogènes qui participent à la séparation néguentropique des compartiments de la Biosphère, et donc à la séparation basse/haute entropie (comme les glaces des pôles et les eaux chaudes de l'équateur).

Ce qui constitue une spirale de production néguentropique en expansion croissante qui illustre parfaitement que (premier principe, formulation 2) : « *La néguentropie dans la biosphère tend à sa manifestation la plus complète* »

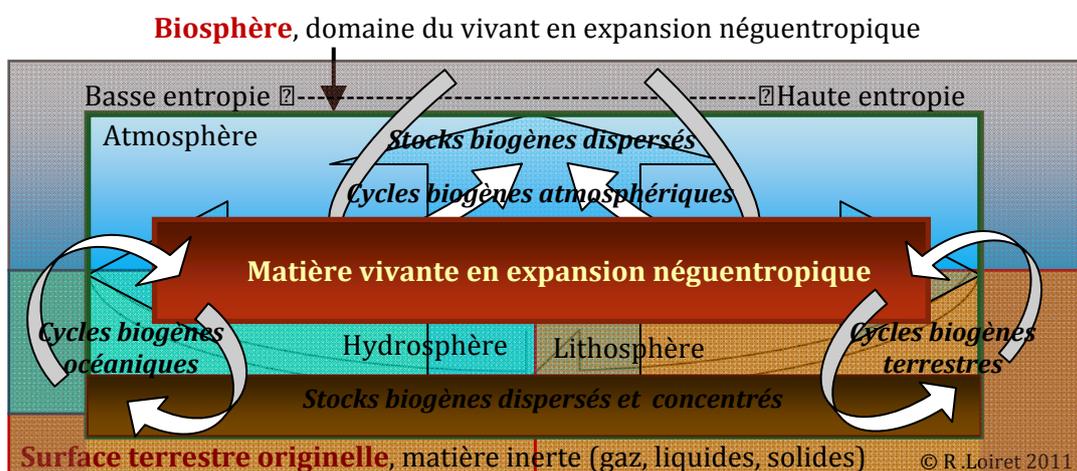
Bilan thermodynamique :

Il ressort des principes actifs du schéma ci-dessous qui rejoint les schémas de la figure 30, un constat essentiel en termes de bilan thermodynamique. Il ne saurait y avoir dans la Biosphère, en l'absence de l'homme, et comme dans un système ouvert normal, un bilan comptable de production de type crédit-débit = solde, ou dans ce cas « néguentropie - entropie = solde ».

Car le vortex utilise en continue la matière inerte à forte entropie de mélange de la surface originelle pour produire une matière vivante néguentropique et des déchets biogènes qui eux mêmes vont participer à l'optimisation de cette néguentropie. L'entropie ultérieure est entièrement utilisée à la coproduction de néguentropie, et il ne saurait même y avoir production d'une entropie ultérieure des déchets biogènes sans qu'ils participent à leur tour au cycle vertueux de production de néguentropie (figure 30)

Notons dans ce contexte un paradoxe de l'entropie que nous avons tenter d'illustrer dans la figure 30. La plus forte entropie n'est ni numériquement la plus basse ni numériquement la plus haute, la plus forte entropie est l'entropie moyenne résultant du mélange de leurs potentiels différenciées, car elle ne permet plus aucun travail. Sauf pourtant à servir les besoins de la matière vivante, comme nous l'examinerons lors de notre étude du second principe.

Figure 32 : Représentation des cycles de transformation néguentropique de la Biosphère



5.9 Le point de vue d'Edgard Morin

Nous ne terminerons pas l'étude du premier principe biogéochimique sans citer E. Morin, qui a consacré quelques chapitres de *La méthode* (I. *La Nature de la Nature*, Morin, 1977) aux relations entre entropie et néguentropie.

E. Morin⁶² est, à notre connaissance, le seul auteur, d'une autorité établie dans l'univers scientifique occidental, qui, s'inscrivant dans le débat relaté dans notre « point de vue thermodynamique », ne boucle pas ses travaux sur le principe SBVB.

Principe selon lequel, comme nous avons pu le comprendre, il y a toujours un homme qui a vu l'homme, qui a vu l'homme, ... qui a vu l'ours ! Sans que pourtant jamais on aperçoive cet ours, vu ici comme la source néguentropique qui contredit l'éternel principe entropique.

Le seul auteur chez qui la « production néguentropique » du vivant acquiert « explicitement » un statut d'autonomie (au sens propre) face à l'entropie, au point d'engager un débat contradictoire entre l'une et l'autre, de les positionner face à face dans une discussion épistémologique sur les origines de l'« organisation »⁶³, un thème central de ses travaux.

Pour donner la « température » contextuelle de son regard sur l'épistémè moderne dans *La méthode I*, citons en introduction ce petit extrait, qui se rapporte à la cybernétique, autre discipline émergente de la seconde moitié du XXe siècle, qui s'inscrivait dans les questionnements nouveaux de la mécanique quantique, des théories de l'information, des systèmes, de l'organisation du vivant, et des processus irréversibles.

Morin (1977, p. 251) : « *La cybernétique s'est ainsi moulée dans les cadres de pensée et d'action dominants au lieu de les dominer. Après avoir dépassé, dans le concept de machine, le réductionnisme qui découpait le tout en ses éléments, elle a développé le réductionnisme qui ramène tous les être-machines vivants ou naturels, au modèle de la machine artificielle...constituant une théorie apparemment purement physique, en fait purement idéologique* ».

Il résumait là le contexte de notre société actuelle de l'information, dans lequel un « idéal-machine » économicisé, au fond purement idéologique, domine tout idéal social et environnemental, sans même que nous osions parler de vivant. Des mots qui nous remémorent ceux de Vernadsky quand il justifiait son principe de « généralisation empirique ».

Mais entrons dans le vif du sujet de *La méthode I*, premier chapitre de la troisième partie : *L'organisation néguentropique*, qui vient fort à propos dans notre interrogation.

E. Morin pose ici le problème du renversement, certes local et temporaire, mais réel, du cours de l'entropie, et du caractère paradoxal de la vie, qui emprunte de la façon la plus étonnante le sens interdit par l'entropie.

Morin (1977, p. 292) : « *Pourtant ce caractère paradoxal fut anesthésié pendant plus d'un siècle : en effet, l'organisme n'était pas perçu comme système physique ; plus encore : l'infraction permanente que semblait commettre l'être vivant à la loi thermodynamique fournissait la preuve « vitaliste » que les « lois » de la « matière vivante » ignorent les lois dégradantes de la « matière physique ».* »

Preuve que le débat engagé par Vernadsky, repris dans le présent cahier, était plus que central dans la société savante parisienne (et européenne, et...) des années 20 du XXe siècle (et encore aujourd'hui), quand nous savons que E. Morin est un des plus éminents épistémologues (philosophe des sciences, théoricien de la connaissance) de notre temps.

Puis E. Morin entre au cœur du débat.

⁶² Quand nous citons des personnes bien vivantes, nous préférons, simple marque de respect, garder l'initiale de leur prénom, quoique le déroulé logique de notre démonstration par référence scientifique ne l'a pas toujours permis.

⁶³ La question de l'organisation chez E. Morin est d'abord celle des systèmes sociaux, mais elle traverse toutes les relations qu'établissent entre eux quelques êtres vivants que ce soient.

5.9.1 Processus néguentropique de production et état néguentropique

Morin (1977, p. 292) : « Il fallut toute l'insistance du regard physicien de Schrödinger pour qu'enfin le problème de l'organisation soit posé sous l'angle des deux sens de l'entropie. Du coup, il se produit une dissociation entre le négatif et le positif de l'entropie, qui demeure pourtant **une** à la base, et l'idée de néguentropie prend corps. Mais elle prend corps uniquement pour ce qui relève d'une organisation active. Si l'on demeure dans le cadre des organisations non actives et des systèmes clos, la néguentropie continue à ne pas se différencier de l'entropie, sinon par une lecture en négatif de la même grandeur, **lecture qui n'a aucun intérêt parce qu'elle n'indique pas le sens du processus évolutif**. Par contre dans le cadre des organisations actives et productrices-de-soi la néguentropie prend figure de processus original qui, tout en le supposant, devient antagoniste au processus d'entropie croissante. Autrement dit, le processus néguentropique renvoie à une tout autre **Gestalt** ou configuration organisationnelle que celle où règne seul le processus entropique, bien que cette organisation produise nécessairement de l'entropie. »

Avec son « organisation active », E. Morin nous aide ici à différencier l'apport structurel fondamental du premier principe de Vernadsky en regard des travaux ultérieurs tels qu'étudiés dans notre point de vue thermodynamique, avec leur principe SBVB.

Ceci quand il distingue par cette organisation le « processus néguentropique de production » d'organisation du « processus entropique d'entretien » (de l'état stationnaire) de cette organisation (comme un moteur qui tourne au ralenti). Etat stationnaire durant lequel un système ouvert consomme en continu la néguentropie du milieu extérieur (essence) pour y rejeter son entropie (gaz d'échappement, ...).

Une différence que nous pouvons résumer dans la différence entre production et consommation d'énergie libre.

Ce en quoi E. Morin centre enfin l'attention, à la différence de ces prédécesseurs, sur le seul vrai débat fondamental, la question de Bonsack : comment fut produite la néguentropie originelle ?

Pour bien clarifier cette différence, il l'aborde ensuite en termes de bilan entropique.

Morin (1977, p. 293) : « Or le bilan d'entropie stationnaire, loin de révéler un état zéro, est en fait la somme nulle résultant de deux processus antagonistes, l'un désorganisateur (entropie croissante), l'autre réorganisateur (néguentropie). Elle masque du coup ces deux processus inverses. Ici le bilan d'entropie stationnaire occulte **le processus original et génératif, qui produit et régénère l'état stationnaire**. Aussi il nous est nécessaire de distinguer la néguentropie-processus, qui se réfère à une organisation douée de générativité, de la néguentropie-mesure, qui quantifie des états. »

Il insiste donc sur le processus génératif du vivant (pour ramener l'organisation à notre cas), et non plus comme on le fit auparavant sur le seul principe de son entretien par consommation d'autres formes de vivant (chaîne trophique).

Quel intérêt en effet à dire que l'entropie s'entretient par une néguentropie ayant comme contre partie l'entropie. Il est bien certain que l'entropie négative consommée, quand un système est « stationnaire » (quand il a fini sa croissance), sera égale, sauf la différence de signe, à l'entropie rejetée, et ne nous dira rien quand au sens de son évolution.

Ce qui donne tout son poids à la contradiction de Vernadsky, quand elle met en exergue un principe par lequel le vivant en expansion génère une augmentation néguentropie constante à travers le « processus néguentropique d'organisation » des compartiments de la Biosphère.

Et quand son premier principe finalement **nous indique le sens d'un processus évolutif contradictoire à celui de l'entropie**.

Ce qui n'est pas rien au regard de la contradiction qu'apporta la théorie de Darwin à la physique classique.

5.9.2 Portée du processus néguentropique d'organisation

Mais E. Morin semble plus loin dans son texte réduire la portée de la néguentropie de processus.

Morin (1977, p. 293) : « *La néguentropie-processus (son concept) se situe au même niveau évolutif que celui de Clausius, dont elle devient le complémentaire antagoniste (...). La différence est que la néguentropie-processus n'est pas universelle comme l'entropie ; elle ne peut s'installer dans le cadre général du « système » ; elle n'a d'existence que dans le cadre spécifique et original des organisations productrices-de-soi...*

Il en réduit la portée parce qu'il ne regarde semble-t-il ces organisations productrices-de-soi que comme des entités autonomes, des formes de « cas à part » à l'intérieur du cadre général du « système » universel d'explication à nous donné par la science vue comme un tout.

Et effectivement, comme il le dit (suite immédiate de la citation précédente) : « *Il y a bien, dans la nature, des états néguentropiques hors organisation comme le déséquilibre entre une source chaude et une source froide ; mais ces états ne deviennent processus néguentropiques que s'il existe des organisations qui utilisent ces états pour leur production : ainsi l'état néguentropique du rayonnement solaire sur la surface de la terre devient processus néguentropique avec et par l'organisation végétale qui le transforme pour la production-de-soi et sa régénération permanente. De même, la néguentropie statique du charbon et du pétrole, qui se mesure en termes de grandeur, ne devient processus néguentropique que par et dans les activités d'extraction, transformation, utilisation anthropo-sociales.* »

Ce qui nous montre que E. Morin ne disposait pas du concept de Biosphère « au sens de Vernadsky », qui, comme nous avons pu le voir, relie l'ensemble des exemples d'état et d'organisation néguentropiques cités dans ce texte. L'état néguentropique du « déséquilibre » entre source chaude et froide, la néguentropie statique du carbone telle que l'avons mesurée nous mêmes, et finalement l'organisation néguentropique qui produit et relie tout cela : la matière vivante.

Toutes choses qui, rapportées à l'échelle de la Terre, « réduisent la réduction » de portée de la néguentropie-processus face au principe universel de Clausius. Les états cités par E. Morin n'affichent plus en effet leur caractère néguentropique « seulement quand » ils sont utilisés par l'économie, mais deviennent l'état néguentropique reflétant un processus néguentropique d'organisation global à l'échelle planétaire, sur lequel il convient dès lors de mettre tout l'accent.

Alors, certes, rien ne nous dit ce que devient ce processus à l'échelle universelle où règne le principe de Clausius, et nous laissons cette problématique aux exobiologistes, mais la contradiction de Vernadsky n'en demeure pas moins vitale, tant pour ces derniers que pour les simples observateurs que nous sommes.

5.9.3 Coproduction entropie-néguentropie

Mais dans tous les cas E. Morin en viendra aux mêmes conclusions que Vernadsky : il existe un processus de coproduction néguentropie-entropie, une boucle récursive de relation interactive sans laquelle il ne pourrait y avoir de processus d'organisation active.

Morin (1977, p. 296) : « *...mais les processus néguentropiques ne peuvent se passer des processus d'entropie croissante, c'est à dire que l'idée de néguentropie est complexe (comportant son antagoniste) et rend complexe du coup le concept global d'entropie (qui inclut les deux processus) ... Aussi, dès qu'on se place du point de vue de l'organisation néguentropique, l'opposition terme à terme entre entropie et néguentropie ne suffit pas ; il nous faut nécessairement l'inclure dans une relation complexe, c'est à dire non seulement antagonique et concurrente, mais aussi complémentaire et incertaine. Il nous faut donc trouver le méta-point de vue qui à la fois englobe la relation néguentropie/entropie et la relation organisation active/environnement.* »

Et il nous semble bien que Vernadsky nous a offert ce méta-point de vue, en nous montrant que l'entropie ne croissait, « dans la Biosphère », qu'à proportion de la néguentropie !

Sauf la présence de l'homme !

6. En guise de conclusion

De tous les auteurs de notre point de vue thermodynamique, E. Morin mis à part, aucun ne s'était référé à une quelconque production d'organisation néguentropique à partir du « désordre » ambiant.

Nous avons avec Schrödinger et Von Bertalanffy un principe de « l'ordre par l'ordre » caractérisant le comportement des systèmes ouverts « vivants ».

Et nous avons avec Prigogine ce même principe de « l'ordre par l'ordre » caractérisant le comportement des systèmes ouverts « mécaniques ».

Nous savons maintenant qu'il existe un principe de production « d'ordre à partir du désordre », à savoir de production néguentropique du vivant et de son milieu la Biosphère, à partir de et avec l'entropie du milieu ambiant, qui renouèle et/ou complète le principe de l'ordre par l'ordre.

Vernadsky nous a montré que sans la vie, sans « organisation néguentropique active », il ne saurait y avoir de « désordre entropique » ! Il ne saurait y avoir que cet ordre entropique éternellement soumis d'une surface lunaire incapable de fonder, au delà des variations jour/nuit de température, la stabilité de sa température interne, à l'exemple des organismes vivants, qui maintiennent leur température et leur Ph dans des limites extrêmement étroites, et reproduisent ce processus au sein de leur habitat, la Biosphère.

Autrement dit, il nous a démontré, et E. Morin l'a confirmé, que, sans construction, il n'y a pas de destruction possible, l'inverse s'avérant tout aussi vrai.

Ce en quoi les principes de Vernadsky deviennent bien « contradictoires » au second principe !

Ils nous disent que la vie, ni n'échappe à, ni ne viole le principe entropique, mais qu'elle le « contredit ». Sans pour autant le nier, elle se sert de lui pour exister, elle le met dans sa poche.

La vie coexiste avec lui, comme de tous temps le principe femelle coexiste avec le principe mâle, dans de mauvaises ou de bonnes conditions, qu'il le veuille, l'ignore ou le refuse, et quelle que soit la force de ses muscles, la puissance de sa parole ou la domination de sa pensée.

Ce qui ne suppose pas que le principe de Carnot étendu par Clausius ne soit plus maître en « son » domaine (Bonsack : « si un principe a une exception, ce n'est plus un principe »).

Non, le problème est simplement que, quoi qu'il exprime et définisse, quoiqu'il dise et clame, il existe, tout simplement, une « autre » expression qui, simultanément à lui, mais dans son propre domaine, celui de la vie, subsiste malgré lui et par devers lui, quelle que soit sa tendance à la domination universelle sur le temps, l'espace, et au passage sur les hommes, leur pensée et leur économie.

A la puissance mythique de l'entropie, la « matière vivante », la matière biogène (la matière libre), les « organismes vivants », opposent ainsi leur propre « réalité », tout aussi universelle.

Cette réalité « coexiste » avec le principe entropique.

Et peu importe que ce soit en parallèle ou en face, dessus ou dessous, à l'intérieur ou à côté.

Le plus important à ce stade est que cette réalité nous apparaisse indubitable !...

... mais ce n'est pas tout.

Que devint Vernadsky suite à cette conférence de 1930, où il disait enfin le fond de sa pensée et formulait son espoir d'une nouvelle science de la vie ?

Le 7 novembre 1929, soit dans les moments même où il préparait sa conférence, Staline publiait dans *La Pravda* un article retentissant, intitulé « Le grand tournant ». Il y annonçait sa décision de mettre enfin en œuvre la collectivisation de l'agriculture, ce grand projet auquel Lénine avait du renoncer dix ans plus tôt, face à la résistance de la paysannerie.

C'est à dire ce processus nommé « Tragédie des cinq épis » », qui entama dans la paysannerie d'URSS les grandes purges de Staline avec en contrepartie l'effondrement de l'agriculture soviétique et, à l'image de l'Angleterre 150 ans plus tôt, ce que Marx avait si brillamment critiqué : l'accumulation primitive du capital (soviétique).

Comme si l'histoire, au moment même de la formulation d'un principe du vivant, avait décidé d'en prendre exactement le contrepied : en finissant d'arracher les hommes à leur travail multiséculaire de coopération avec le vivant, dans l'Ecosphère, pour les envoyer à la mort.

Et que devint Vernadsky dans un tel contexte ?

Il aura un autre destin, qui comme nous l'avons dit, l'enfonça dans des contradictions insoutenables, entre une science de la vérité (du vivant) dont il hérita de Tolstoï les grands principes, et la logique au sens propre infernale, d'abord du stalinisme, ensuite des machines staliniennes et nazies en confrontation.

Un destin qui témoigne du sens d'une histoire qui n'a pas pu avoir lieu, qui s'est arrêtée ou fut stoppée, et d'un « sens de la vie » complètement détourné, remplacé par une autre histoire où l'humanisme agonise (ou plutôt repose) désormais sous les décombres du pire des siècles humains que le monde a jamais connu.

Pire que tout, l'année 1945, quelques mois après sa mort (le 6 janvier), qui connut les derniers moments de la seconde guerre mondiale, connu la première explosion atomique de Hiroshima (le 6 août).

Puis vinrent ensuite la guerre froide, les 30 glorieuses, l'industrialisation,..., et la pensée unique, la mondialisation, la destruction de l'environnement, le changement climatique, ...

Ces événements pour le moins « imprévus » introduisaient pour la première fois dans l'histoire de la vie, selon Vernadsky, une « exception » dans ses « propriétés planétaires », et dans les deux principes biogéochimiques. Car il est désormais patent que l'homme intervient sur la Biosphère et l'Ecosphère avec une telle puissance qu'il est absolument capable de détruire, jusqu'à lui même, ce que la vie aura mis « **3,8 milliards d'années** » à construire.

Car l'homme effectivement, est sorti de l'Ecosphère.

Ce qui est une autre histoire, qui devra nous dire si ce qui n'est encore qu'une exception aux principes de Vernadsky, deviendra ou non une contradiction fondamentale des principes du vivant.

7. Références

- Académie des sciences, 2007. Cycles biogéochimiques et écosystèmes continentaux. Publication Institut de France.
- Ademe, 2010. Bilan Carbone. Guide méthodologique - version 6.1 - Objectifs et principes de comptabilisation.
- Ajtay, G. L., Ketner P., et Duvigneeaud P., 1979. Terrestrial primary production and phytomass. 129–81. In B. Bolin, E. T.
- Amthor J. S., & alii, 1998. Terrestrial ecosystem responses to global change : A research strategy. Ecosystems Working Group. Environmental Sciences Division. Publication N° 4821
- Atlan, H., 1979. Entre le cristal et la fumée. Editions du Seuil, Paris.
- Aubertin C., Vivien F-D., 1998. Les enjeux de la biodiversité. Editions Economica, Paris.
- Bailly, F., Longo, G., 2008. Organisation biologique et entropie négative : A partir des réflexions de Shrödinger. Edition électronique. Paru en anglais sous le titre : Biological organization and anti-entropy. Journal Biological Systems, Vol. 17, No. 1, pp. 63-96, 2009
- 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.
- Bonsack, F., 1961. Information, thermodynamique, vie et pensée. Gauthier-Villars Editeur, Paris.
- 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.
- 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, pp 361-400. Paris.
- 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, J. Gowdy and K. Mayumi, Eds. (Edward Elgar Publishing, Cheltenham, England), pp. 125-154.
- Cole, L.C., 1958. The ecosphere. Man and the ecosphere. Readings from Scientific American, San Francisco, 1971.
- Colloque de l'Inra, 1982. Les mycorhizes, partie intégrante de la plante : biologie et perspectives d'utilisation. Edition Inra, Dijon.
- 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.
- Deléage, J.P., 2002. Introduction à la nouvelle édition française de *La Biosphère*, de Vernadsky. Editions du Seuil, 2002.
- De Rougemont, D., 1936. Penser avec les mains. Editions Gallimard, Paris, 1972.
- Descartes, R., 1637. Discours de la Méthode, pour bien conduire sa raison et chercher la vérité dans les sciences. Editions Bordas, 1984.
- Des Marais, D. J., 1998. Earth's Early Biosphere. NASA, Ames research Center, Moffett Field, California, USA.
- 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., 2009. Origins and Cycling of CO₂ from Earth during the Archean and Proterozoic Eons. Search and Discovery Article #110112 (2009). Adapted from oral presentation at AAPG Annual Convention, Denver, Colorado, June 7-10, 2009. NASA, Ames research Center, Moffett Field, California, USA.
- Driesch, H., 1914. History and Theory of Vitalism. Macmillan, London.
- Driesch, H., 1927. Mind and Body, Methuen, London.
- Ducrocq, A., 1989. L'objet vivant. Editions Stock, Paris.
- Erb, K-H., Krausmann, F., Gaube, V., Gingrich, S., Bondeau, A., Fischer-Kowalski, M., Haberl, H., 2009. Analyzing the global human appropriation of net primary production - processes, trajectories, implications. An introduction. Ecological Economics 69, 250-259, Elsevier Science, 2009
- 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.
- 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.
- 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). francour@unice.fr
- Georgescu-Roegen, N., 1979. La décroissance. Entropie-Ecologie-Economie. Edition électronique.
- GFN, 2004. National Footprint Accounts 1999 provided by the Global Footprint Network : <http://www.footprintnetwork.org>
- GFN, 2009. Ecological Footprint Standards. Global Footprint Network, Oakland, CA. : <http://www.footprintnetwork.org>

- Grenfell, J. L., et al., 2008. Co-evolution of atmospheres, life, and climate. Contribution de 22 auteurs (Max Planck Institute, Université de Paris sud et Bordeaux I, German aerospace center, ...). Disponible à : <http://arxiv.org/abs/1005.3589>
- Grenier, E., 2000. Vladimir Vernadsky, De la biosphère à la noosphère. Magazine Fusion, n°83, novembre-décembre 2000.
- Grinevald, J., 1994. Introduction à la deuxième édition de *La décroissance*. Entropie-Ecologie-Economie, pp. 9-29. Edition électronique.
- Grinevald, J., 1997. Introduction à l'édition américaine de *La Biosphère*. The Biosphere, édition du Far West Institute, USA, 1998.
- Grinevald, J., 2002. Biodiversité et Biosphère. Une production originale du magazine L'État de la planète, www.delaplanete.org, No 1 janvier – février 2002.
- Grinevald, J., 2006. Nicholas Georgescu-Roegen, dissident de l'occident et visionnaire de la décroissance. La Revue Durable N°20. 2006.
- 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
- Howard, Sir A., 1940. Testament agricole pour une agriculture naturelle. Editions Vie & Action, 1971.
- Huggett, R. J., 1999. Ecosphere, biosphere, or Gaia? What to call the global ecosystem. *Global Ecology and Biogeography* (1999) 8, 425–431
- Kump, L. R., James, F. K., Barley, E.B., 2001. Rise of atmospheric oxygen and the « upside down » Archean Mantle. *G³, An electronic journal of the earth Sciences, Research letter, Volume 2, January 23, 2001.*
- Loiret, R., 2008. Vers une nouvelle économie des ressources. Rapport interne. Région Provence-Alpes-Côte d'Azur & Agence Régionale pour l'Environnement Provence-Alpes-Côte d'Azur.
- Loiret, R., 2009. L'Empreinte Ecologique des collectivités françaises, premiers résultats d'une application à la France de la méthodologie « REAP » (cf Wiedmann & Barrett, 2005) du Stockholm Environment Institute. Disponible à : richard@loiret.me
- Loiret, R., 2011(a). Programme EMPR-PNRs. Empreinte écologique et indicateurs phares pour les Parcs naturels Régionaux. Rapport d'exécution de l'année 1.
- Loiret, R., 2011(b). 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. Disponible à : richard@loiret.me
- Loiret, R., 2011(c). 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. Disponible à : richard@loiret.me
- Loiret, R., 2011(d). Programme EMPR-PNRs. Empreinte écologique et indicateurs phares pour les Parcs naturels Régionaux. Rapport n°3. Du constat des limites actuelles de « l'Empreinte Ecologique » à son évolution recherchée : Pour une prise en compte de la « biodiversité » des espaces naturels & pour son intégration dans les cadres statistiques internationaux.
- 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., 1987. Chaire de « Théories et systèmes d'organisation », CNAM, Paris. Copie personnelle du Cours intégral du Professeur Bruno Lussato.
- Margulis, L., Sagan, D., 1986. L'univers bactériel. Edition Albin Michel, Paris, 2002.
- Meadows, D.H., & alii, 1972. *The Limits to Growth*. Universe Book, London Earth Island, New York.
- Morin, E., 1977. La méthode. La Nature de la Nature. Editions du Seuil, 1977.
- O'Connor, M., 1994. 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
- Odum, H.T., Brown, M.T., Christianson, R.A., 1986. Energy Systems, Overview of the Amazon Basin. Center for wetlands, University of Florida, Gainesville, FL, 32611
- Odum, H.T., Arding, J.E., 1991. Emergy analysis of shrimp mariculture in Ecuador. Working paper. Center for wetlands, University of Florida, Gainesville, FL, 32611
- Odum, H.T., 1996. Environmental Accounting, Emergy and Decision Making. J. Wiley, NY.
- Passet, R., 1979. L'économique et le vivant. Petite bibliothèque Payot, Paris.
- 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.

- Reboul, C., 1987. Monsieur le Capital et Madame la Terre, Fertilité agronomique et fertilité économique. Co-édition edi-INRA, Paris, 1989.
- Rush, H. P., 1968. La fécondité du sol. Editions Le Courrier du Livre, Paris, 1972.
- SEEA, 2003. Handbook of National Accounting. Integrated Environmental and Economic Accounting. United Nations-European Commission-International Monetary Fund- Organisation for Economic Co-operation and Development-World Bank
- Schrödinger, E., 1944. Qu'est-ce que la vie ? Collection Points-Sciences. Editions du Seuil, Paris, 1993.
- Sheldrake, R., 1981. Une nouvelle science de la vie. Editions du Rocher, Paris, 1985.
- Sheldrake, R., 1991. L'âme de la nature. Editions Albin Michel, Paris, 2001.
- 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. Editions Mouton & Co, Paris.
- Sir Albert Howard, 1940. Testament agricole. Editions Vie & Action, Marcq-Lille, 1971
- UNEP, 2005. Convention on biological diversity. Indicators for assessing progress towards the 2010 target : Ecological footprints and related concepts. Montreal, 28/11-2/12 2005
- Vackar, D., 2008. The Ecological Footprint and Biodiversity. Charles University in Prague, Environment Centre, Prague, Czech Republic
- Venetoulis, J., Talberth, J., 2008. Refining the ecological footprint. Environ. Devel. Sustain. 2008, 10, 441–469.
- Vernadsky, biographie : Voir Bailes, K.E., 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. Ouvrage publié en France en 1924. Introuvable à ce jour, nous avons pu en obtenir quelques extraits chez Grenier (2000), et des articles préparatoires chez Vernadsky (1922 et 1924 (a))
- 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., 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
- Vernadsky, W., 1943. L'autotrophie de l'humanité. Article disponible à : <http://vernadsky.fr/documents.html>
- Vernadsky, W., 1944. La Biosphère et la Noosphère. Article publié dans American Scientist en 1945.
- Von Bertalanffy, L., 1968. Théorie générale des systèmes. Editions Dunod, Paris, 1973.
- Waksman, S., 1938. Humus : Origin, Composition, and Importance in Nature. Photocopie d'une traduction française inédite, Bibliothèque de l'Inra, Antibes, France.
- 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. Sustainability 2010, 2, 1645-1693.
- Wiener, N., 1950. Cybernétique et société. Dans Bounoux, D., 1993. Sciences de l'Information et de la Communication. Larousse, Paris. pp 442-454.
- WWF, 2002, 2003, 2004, 2005, 2006, 2007, 2008, 2009. Living Planet report
- Zahnle, K., Arndt, N., Cockell, C., Halliday, A., Nisbet, E., Selsis, F., Norman, H.S., 2007. Emergence of a Habitable Planet Space Sci Rev (2007) 129: 35–78
- Zahnle, K., Schaefer, L., Fegley, B., 2010. Earth's Earliest Atmospheres. Cold Spring Harbor Perspectives in Biology. Published by Cold Spring Harbor Laboratory Press, 2010.

8. Mot clefs, usuels et inédits

Actif écologique, Actifs environnementaux, Atmosphère, Bilan carbone, Bilan écologique, Bilan radiatif, Bilan thermodynamique, Biogène, Biogéochimie, Bio-inerte, Biosphère, Biodiversité, Cycles biogéochimiques, Diversité biologique, Ecodéveloppement, Ecosphère, Emergy, Empreinte écologique, Energie libre, Entropie, Entropie négative, Hydrosphère, Hypothèse Gaïa, Index de complexité, Index de biodiversité, Lithosphère, Matière vivante, Nég-entropie, Néguentropie, Qualité biologique, Passif écologique, Principes biogéochimiques, Relations Biosphère-Ecosphère, Solde écologique, Structures créatives, Systèmes ouverts, Structures dissipatives, Systèmes clos, Systèmes fermés, Systèmes isolés, Vadose, Valeur ajoutée biologique, Vitalisme