

## Ecole doctorale SHS

### Soutenance de thèse de doctorat en Economie (Ecologique)

NNT : 2016SACLV001

# Le Bilan écologique

Mesurer la perturbation anthropogénique de l'Ecosphère et de la Biosphère

Caractériser les voies du Développement écologique des territoires

Richard Loiret

Le 27 janvier 2016

#### Membres du Jury :

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

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

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

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

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

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

**0.**

## **Introduction générale**

## 0.1. Objectif général

Elaborer un cadre de mesure *physique* comparant, à toutes échelles potentielles, la production de capital **naturel** et de ***biodiversité*** à leur destruction anthropogénique,

... en vue d'en tirer un **sens** utile à soutenir la formalisation et la mise en œuvre d'un développement vraiment *écologique* des territoires.

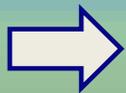
## 0.2.Contexte

### Arrière plan

- **Conférences des Nations Unies sur le développement** (1972, 1992, ...)

### Second plan

- **Convention pour la Diversité Biologique (CDB) : Adoption en 2010 des Objectifs d'Aichi (2011-2020) pour la biodiversité, portant notamment sur l'intégration des valeurs de la diversité biologique dans les comptabilités nationales**
- **Système de comptabilité environnementale et économique des Nations Unies (SCEE/SEEA) : Reconnaissance en 2012 de la nécessité d'insérer une comptabilité écosystémique dans le SCEE**



Intégration de plus en plus évidente de la biodiversité dans les objectifs de développement soutenable et les outils décisionnels

### Premier plan

**L'Empreinte Ecologique** (GFN, 1994, 2010, ...) : Un **indicateur synthétique** de développement durable (idd, comme outil de décision), qui s'est efforcé de répondre à des enjeux en évolution constante.

# 0.3 : Problématique

En forme de « **poupée russe** », à différents **niveaux de résolution**

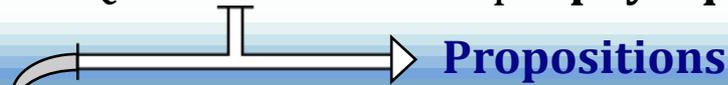
**N1** : Quelle forme **explicite** de comptabilité écologique et économique ?



**N2** : Quel **découpage** des relations Nature-Economie ?



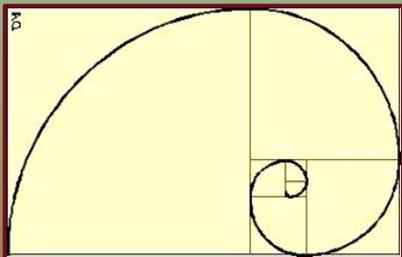
**N3** : Quelle unité de compte **physique** du bilan ?



**N4** : Quelle mesure de la **biodiversité** ?



**N5** : Quel **bilan**, et quel indicateur de **synthèse** ?



## 0.4. Méthodologie

Approche empirique, *systemique*, transversale, méticuleuse, adaptative, et quand de besoin d'*apprentissage*, fonction des disciplines, et des différents niveaux de problématique et de résolution potentielle.

- Théories des systèmes, d'organisation et de l'information (Von Bertalanffy, Lussato, Bonsack,...),
- Complexité (Morin, Atlan, ...),
- Recherche opérationnelle, modèles d'économie physique, analyse I/O (Valette, O'Connor, Mc Donald, Patterson, Wiedmann, ...)
- Analyse énergétique, économie écologique (Odum, Passet, O'Connor, ...),
- Chimie et thermodynamique des processus biologiques (Vernadsky, Prigogine, Zotin, Jørgensen, ...)
- ....

## 0.5. Plan de l'exposé

- 1** : Fondements du Bilan écologique, puis\_recherche épistémologique approfondie sur les **origines** et la **caractérisation** du capital *naturel* et de la *diversité biologique*
- 2** : Mesurer nos **actifs** écologiques : Recherche de nature fondamentale sur la **mesure** de l'énergie *biogéochimique*, susceptible de rendre compte de la *diversité biologique* d'un territoire
- 3** : Mettre en œuvre le **Bilan** écologique sur un territoire pilote : Recherche méthodologique et résultats pour l'actif, le passif et le bilan (= confrontation du passif et de l'actif écologiques)
- 4** : Conclusion et perspectives

# 1.

## Fondements du **Bilan** écologique

et

Recherche épistémologique  
approfondie sur les **origines**  
et la **caractérisation**  
du capital *naturel*  
et de la *diversité biologique*.

*Cahier REEDS (CR) No. 2012-04*

Rendre compte de la biodiversité dans  
le Bilan des relations homme-nature



I

La « Biosphère »  
selon Vernadsky

Analyse, clarifications et commentaires

© Richard Loiret 2012

Doctorant en Economie Ecologique

Cahier de recherche n°1

Centre international REEDS, Université de St Quentin-en-Yvelines

[richard.loiret@univsq.fr](mailto:richard.loiret@univsq.fr) - [richard@loiret.ma](mailto:richard@loiret.ma)



## 1.1 - Quelle forme explicite de **comptabilité** écologique et économique ?

Cette première question vint, comme les suivantes, de l'**Empreinte écologique** (Ee), dont nous voulions tester l'application à un *Parc Naturel Régional, le PNRPA* (1)

- **Concept** très *signifiant*, qui rapporte notre consommation (en gha) à un nombre de **planètes**, tout en *suggérant* une forme de bilan *comptable* des relations homme-nature
- Mais **bilan** *ambigu* et *peu explicite*, au regard notamment des standards internationaux de comptabilité économique et environnementale (SCEE/SEEA)(2)

### Reformulation du concept **d'opposition comptable**

Désignation d'un **Bilan écologique** opposant :

Un **actif écologique** des espaces **naturels**

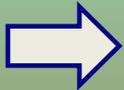
(à comprendre comme une *biocapacité*)

à

Un **passif écologique** de l'économie du territoire

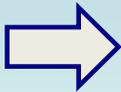
(Ee *en soi*)

(Loiret, 2010, 2011, 2013)

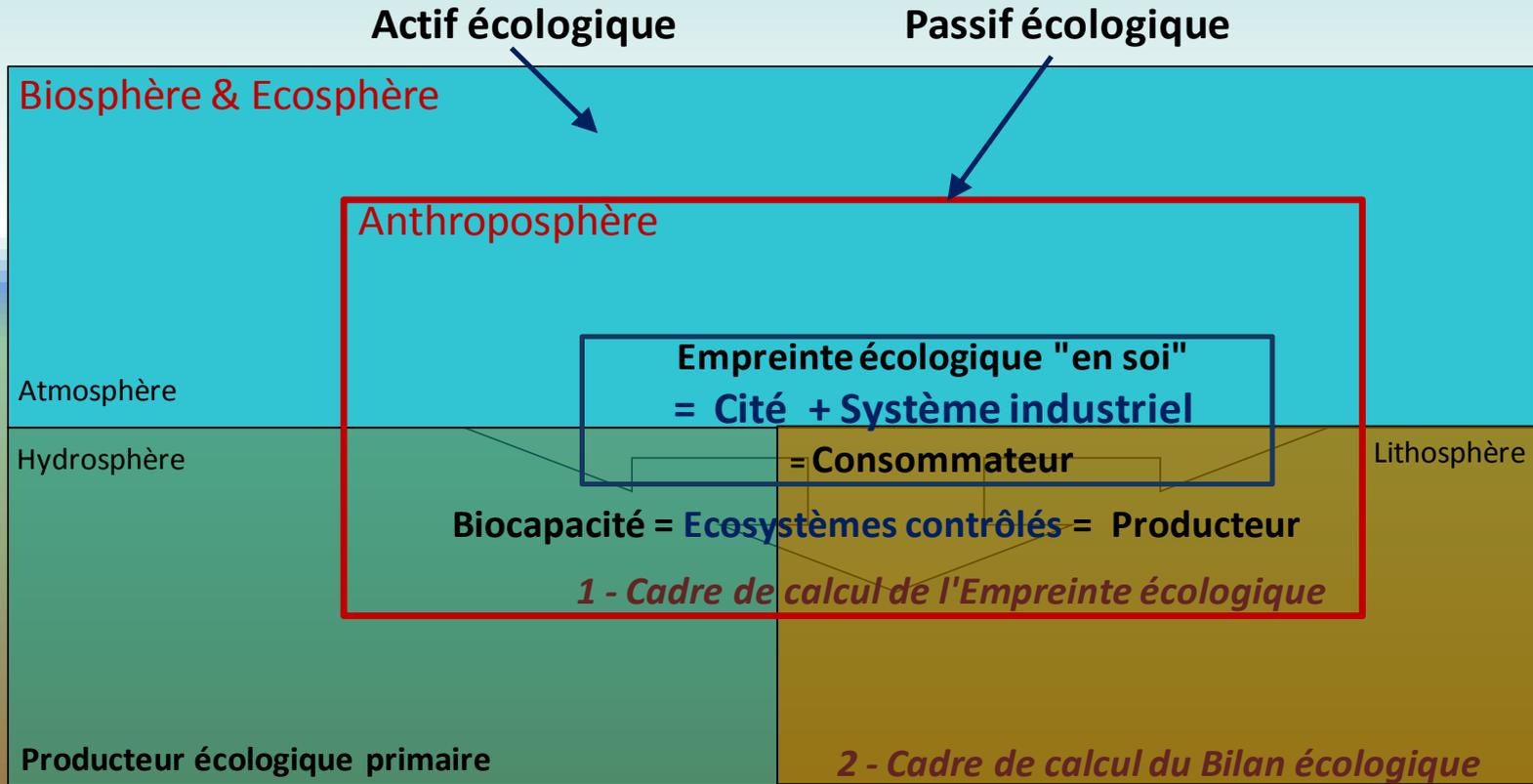


# 1.2 - Quel **découpage** des relations Nature-Economie ? (découpage systémique et spatio-temporel)

- W. Rees (1992), *concepteur* de l'Ee, avait exposé le problème : Toute **production** économique, matérielle, est actuellement **consommation**.
- **Mais** M. Wackernagel (1994), *développeur* de l'Ee, n'avait pu en rendre compte



Reformulation complète du **cadre comptable** et de l'**emprise** du bilan



# 1.3.1 - Quelle unité de compte **physique** du bilan ?

- Le développeur de l'Ee avait pour ambition très « **explicite** » de **mesurer le capital naturel**
- **Mais** il avait adopté un modèle d'*analyse énergétique* qui ne pouvait en rendre compte, en termes *écologiques* et *thermodynamiques*
- Et à fortiori de la **diversité biologique** !

? Modèle de mesure inextensible aux espaces naturels

? Problématique **fondamentale** relative au vivant, et à la **Loi de l'entropie**



Enquête épistémologique approfondie



Cahier de recherche n°1 :  
**La Biosphère selon Vernadsky ...**



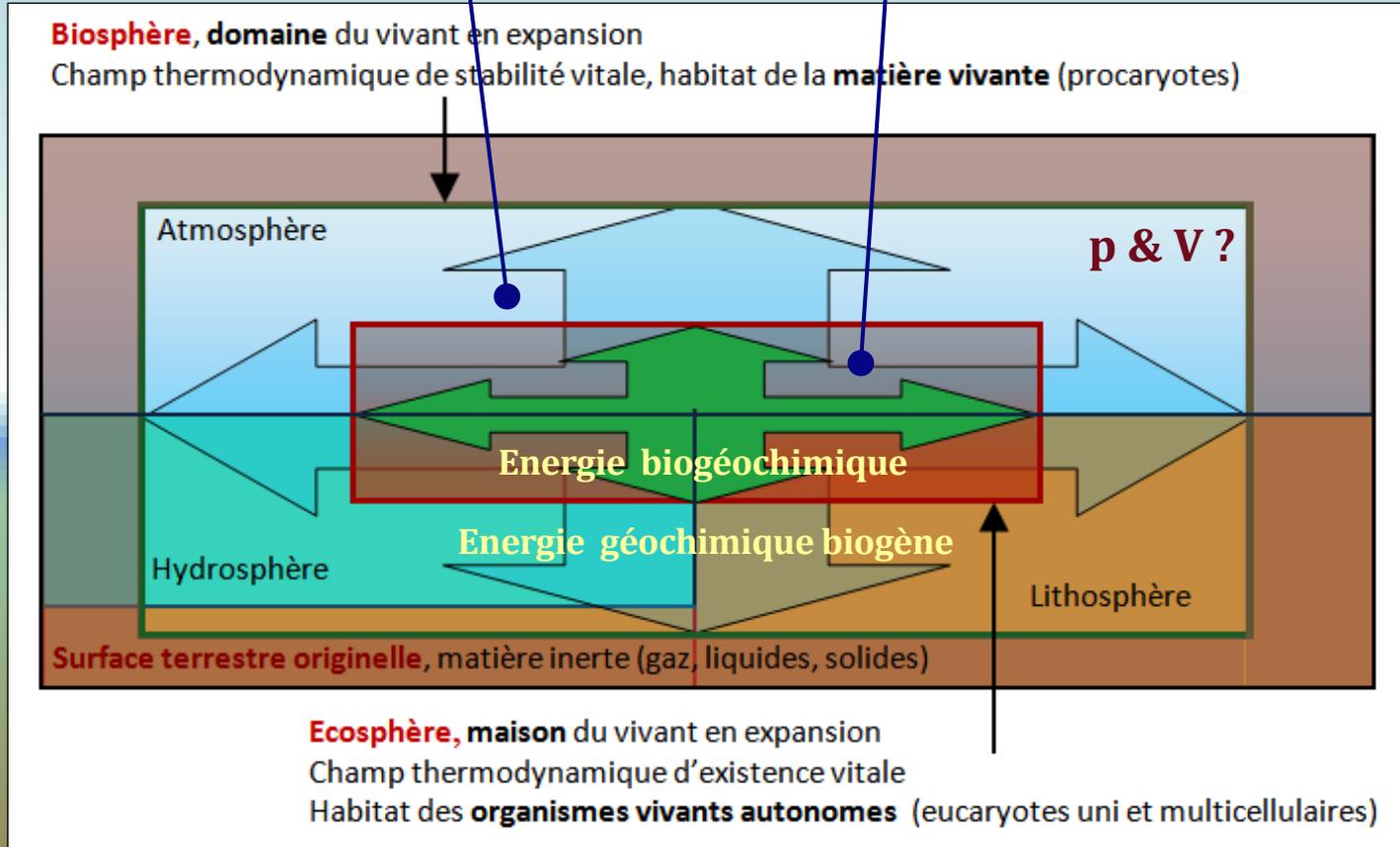
Que produisait donc le **vivant**, pour qu'il **apparaisse** si contradictoire à la nouvelle pensée de la révolution **industrielle** ?

# 1.3.2 -

## Résultats : Grands principes de la Biosphère

**Premier principe biogéochimique**  
(Directionnalité de la Biosphère)  
L'énergie géochimique biogène tend dans la Biosphère à sa manifestation maximale

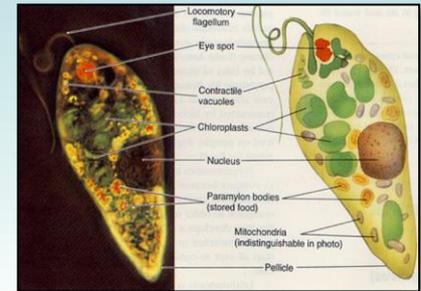
**Second principe biogéochimique**  
(Directionnalité de l'Ecosphère)  
Lors de l'évolution des espèces, ce sont les organismes augmentant par leur vie (leur énergie biogéochimique) l'énergie géochimique biogène qui survivent



Vernadsky (1930) : « 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** »

### 1.3.3 - Synthèse des apports de l'école de Vernadsky

- La *direction de l'évolution* est **contraire** à la *flèche du temps* d'Eddington
- L'**aromorphose** (Severtsov, 1914) a distingué l'Ecosphère de la Biosphère
- L'**augmentation énergétique** des fonctions vitales a développé le progrès morpho-physiologique (et donc la **biodiversité**)
- Les **biogécénoses** de l'Ecosphère (Sukachov,  $\approx$  1925), développent les fonctions « **redox** » du vivant
- L'énergie **biogéochimique** des organismes vivants est strictement distincte de l'énergie **géochemique** des matières biogènes (aujourd'hui nommée **exergie**)



### Conclusion de l'enquête

Tous ces apports établissaient, au delà de l'**exergie**, l'existence d'une énergie **biogéochimique** dont la montée en pression *directionnelle* fut parfaitement corrélative à celle de la *diversité biologique*.

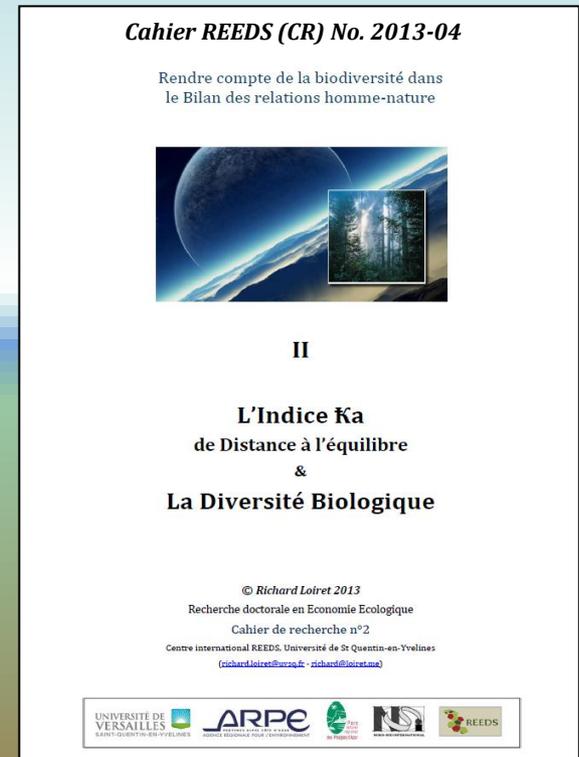
Rendre compte de cette **énergie** et de sa mise en **pression directionnelle** \* équivaudrait ainsi à rendre compte de la **pression de diversité biologique** !

\* Un compresseur **redox** ?

# 2.

## Mesurer nos actifs écologiques :

Propositions relatives  
à une recherche de nature fondamentale  
sur la **mesure** de l'énergie *biogéochimique*,  
comme expression de la *diversité biologique*



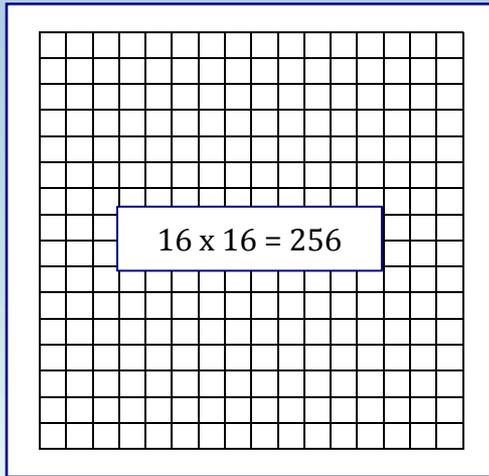
**Hypothèse 1** : Un indice de « **distance à l'équilibre statistique** » ( $D_{ES}$ ) mesurant la **diversité différentielle** (ou structurale) d'une molécule, d'un organisme ou d'un écosystème, évoluerait dans le même sens que leurs densifications massiques et énergétiques.

**Hypothèse 2** : L'**exergie** d'un substrat organique, conjuguée à son niveau de **diversité différentielle**, manifesterait l'énergie **biogéochimique** du vivant et son niveau de **diversité biologique** par sa « **distance à l'équilibre thermodynamique** » ( $D_{ET}$ )

## 2.2 - Proposition 1 : L'Indice $\mathcal{K}_a$ et la diversité structurale\*

Equilibre statistique =  $1/n = 0,0039$

En 2 D



Indice  $\mathcal{K}_a = 0,0000$

Indice  $H' = 2,4080$

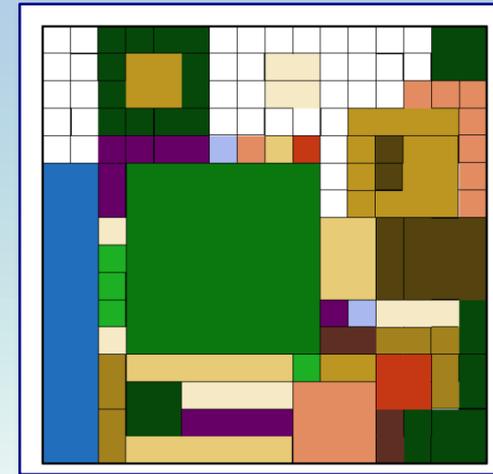
Distance  
à l'équilibre  
« statistique »

$$\mathcal{K}_a = \frac{\sum_{i=1}^n p_i^2 - \frac{1}{n}}{1 - \frac{1}{n}}$$

©R.Loiret 2012



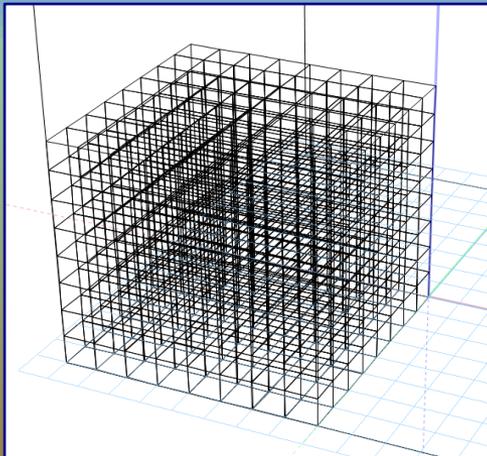
Diversité distante de l'équilibre



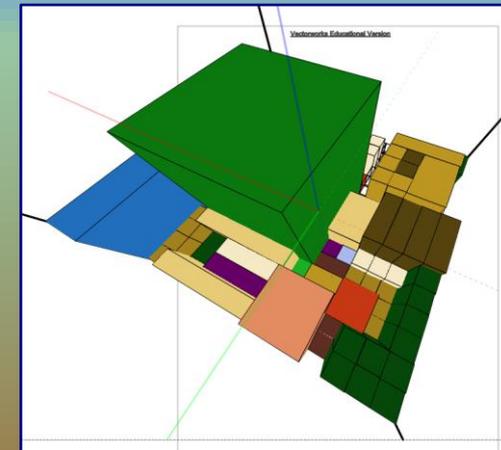
Indice  $\mathcal{K}_a = 0,0544$

Indice  $H' = 0,3400$

En 3 D



L'indice  $\mathcal{K}_a$  est  
une variable  
« intensive »  
(non additive)  
d'information-  
structure  
(Passet, 1979)



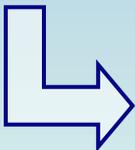
\* ou Distance à l'équilibre « statistique »

# 2.3 - Vérification 1 : L'indice $K_a$ et la directionnalité de l'Ecosphère

Stœchiométrie de molécules des autotrophes montrant la directionnalité des **CHL** et **GPL**

Pour 1 kg de →	Glucose			Amidon/Cellulose			Lignine 1*			Lignine 2**			Huile d'olive***		
<i>Equations stœchiométriques</i>	6CO <sub>2</sub> + 6H <sub>2</sub> O + G = C <sub>6</sub> H <sub>12</sub> O <sub>6</sub> + 6O <sub>2</sub>			6CO <sub>2</sub> + 5H <sub>2</sub> O + G = C <sub>6</sub> H <sub>10</sub> O <sub>5</sub> + 6O <sub>2</sub>			32CO <sub>2</sub> + 22H <sub>2</sub> O + G = 2C <sub>16</sub> H <sub>22</sub> O <sub>8</sub> + 35O <sub>2</sub>			10CO <sub>2</sub> + 6H <sub>2</sub> O + G = C <sub>10</sub> H <sub>12</sub> O <sub>4</sub> + 11O <sub>2</sub>			26,28 CO <sub>2</sub> + 24,22 H <sub>2</sub> O + G = 0,52 C <sub>51</sub> H <sub>94</sub> O <sub>6</sub> + 36,80 O <sub>2</sub>		
	Masse	Exergie massique (pV)	Densité massique (1/V)	Masse	Exergie massique (pV)	Densité massique (1/V)	Masse	Exergie massique (pV)	Densité massique (1/V)	Masse	Exergie massique (pV)	Densité massique (1/V)	Masse	Exergie massique (pV)	Densité massique (1/V)
© RLoiret 2014	g.kg <sup>-1</sup>	MJ.kg <sup>-1</sup>	kg.m <sup>3</sup> <sup>-1</sup>	g.kg <sup>-1</sup>	MJ.kg <sup>-1</sup>	kg.m <sup>3</sup> <sup>-1</sup>	g.kg <sup>-1</sup>	MJ.kg <sup>-1</sup>	kg.m <sup>3</sup> <sup>-1</sup>	g.kg <sup>-1</sup>	MJ.kg <sup>-1</sup>	kg.m <sup>3</sup> <sup>-1</sup>	g.kg <sup>-1</sup>	MJ.kg <sup>-1</sup>	kg.m <sup>3</sup> <sup>-1</sup>
<b>Entrées</b>															
CO <sub>2</sub>	1466	0,66	1,27	1629	0,74	1,14	2057	0,93	0,90	2243	1,01	0,83	2794	1,26	0,67
H <sub>2</sub> O	600	1,51	2,04	556	1,40	2,21	579	1,46	2,12	551	1,38	2,22	1054	2,65	1,16
<b>Energie libre de Gibbs</b>															
		19,55			20,53			24,63			26,00			36,32	
CO <sub>2</sub> + H <sub>2</sub> O + G	2066	21,72	3,31	2184	22,67	3,35	2636	27,01	3,02	2794	28,39	3,05	3848	40,23	1,82
<b>Sorties</b>															
C	400	13,66	668,09	444	15,18	680,24	561	19,17	774,93	612	20,91	807,95	763	26,05	979,76
H	67	7,86	1,34	62	7,28	1,45	65	7,59	1,39	62	7,22	1,46	118	13,81	0,76
O	533	0,07	2,68	493	0,06	2,89	374	0,05	3,82	326	0,04	4,38	120	0,01	11,95
CH <sub>2</sub> O	1000	21,59	672,10	1000	22,52	684,58	1000	26,81	780,13	1000	28,17	813,78	1000	39,88	992,47
O <sub>2</sub>	1066	0,13	2,68	1184	0,15	2,41	1636	0,20	1,75	1794	0,22	1,59	2848	0,35	1,00
CH <sub>2</sub> O + O <sub>2</sub>	2066	21,72	674,78	2184	22,67	686,99	2636	27,01	781,88	2794	28,39	815,37	3848	40,23	993,47
<b>Ind. <math>K_a</math> (masses)</b>	<b>0,162</b>			<b>0,183</b>			<b>0,268</b>			<b>0,299</b>			<b>0,452</b>		
							* Coniférine			** Aldéhyde hydroxiconiferylque			***Margaroleïne		

Directionnalité énergétique



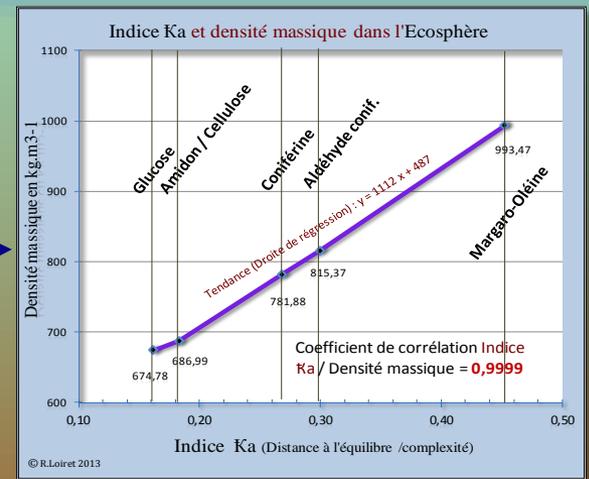
Indice  $K_a$  de distance à l'équilibre statistique

$$K_a = \frac{\sum_{i=1}^n p_i^2 - \frac{1}{n}}{1 - \frac{1}{n}}$$

© RLoiret 2012

Indice $K_a$ du Glucose	
$K_a = Di/Di_{max}$	0,162
$Di_{max} = 1 - 1/n$	0,750
$Di = Di - 1/n$	0,121
$1/n$	0,250
$Di = \Sigma(p_i)^2$	0,371
$\Sigma$ grammes	2.066
400	0,037
67	0,001
533	0,067
1.066	0,266

Molécules	Indice $K_a$ (masses)	Densité massique Kg.m <sup>3</sup> <sup>-1</sup>
Glucose	0,162	674,78
Amidon/Cellulose	0,183	686,99
Coniférine	0,268	781,88
Aldehyde Conif.	0,299	815,37
Margaroleïne	0,452	993,47
<b>Etalon</b>	<b>1,000</b>	<b>1599,20</b>
<b>Coefficient r de corrélation</b>		<b>0,9999</b>



## 2.4 -

### Proposition 2 : Le Joule.mètre (J.m) et la $D_{ET}$ **redox**

**Distance à l'équilibre thermodynamique redox**  
(une mesure proposée de l'énergie *biogéochimique*)

Mesurée en **Joule.mètre** (J.m), c'est la **conjugaison** de :

- L'**exergie** (variable **extensive**) en joules, d'une diversité biologique **redox**, mesurée pour les fonctions ou organismes de l'écosystème à réduction dominante (**CHL**) et à oxydation dominante (**GPL**)

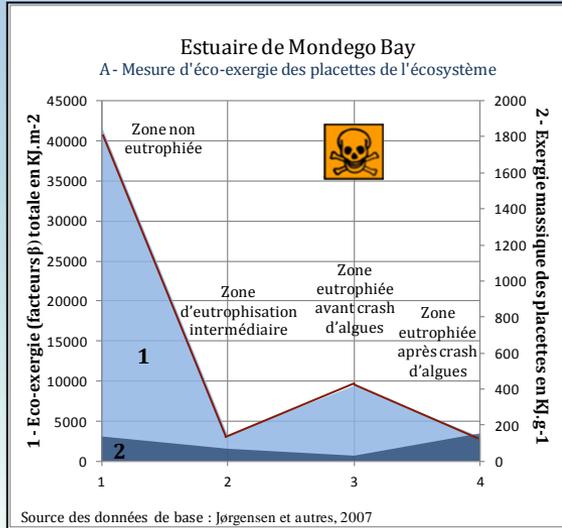
et de :

- L'**indice Ka** (variable **intensive**), ou distance à l'équilibre statistique mesurée en mètre, de ces deux types d'organismes

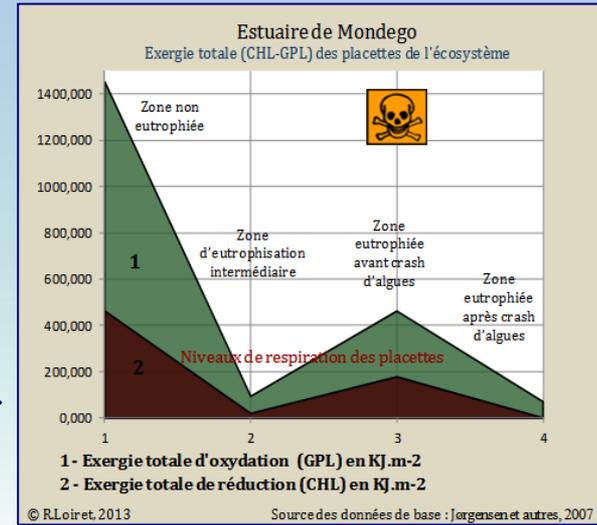
Nous obtenons une distance à l'équilibre de réduction ( $D_{ER}$ ) et d'oxydation ( $D_{EO}$ ) formant ensemble la  $D_{ET}$

$$(D_{ET} = D_{ER} + D_{EO})$$

# 2.5 - Vérification 2 : Mesurer la biodiversité/diagnostiquer l'état redox d'un écosystème



**1**  
Mesures de l'éco-exergie et de l'exergie redox



Diagnostic de « **santé** » d'un écosystème  
-----  
(Que ce soit une masse vivante ou de tourbe, nous pourrions avoir un même niveau d'exergie !)

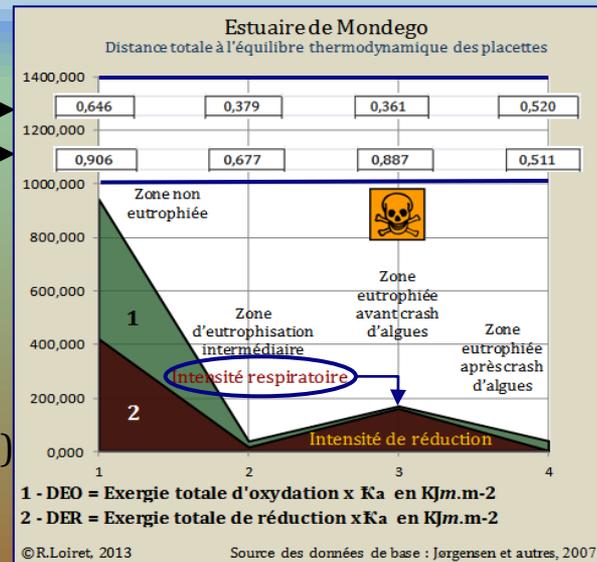
## Indices Ka

Oxydation

Réduction

## 2

Mesure de l'énergie biogéochimique (DET = DER + DEO) en J.m



# 3.

## Mettre en œuvre le **Bilan écologique** sur un territoire pilote

Recherche méthodologique et résultats  
pour l'actif, le passif et le bilan écologiques

## 3.1 - Territoire et années de référence du bilan écologique

- Périmètre (2013) du parc naturel régional des Préalpes d'Azur (PNRPA, 06) : surface = 90.000 hectares, population = 31.663 habitants
- Communes (49) du PNRPA (2013) : surface = 103.949 hectares, population = 99.716 habitants
- **Territoire de référence retenu** = surfaces et population des 49 communes (**comparabilité** de l'actif et du passif écologiques),
- **Années de référence retenues** = 1999 pour le passif, 2000 pour l'actif



## 3.2.1 -

# Actif écologique : Méthodologie générale

Principe de la stœchiométrie « territoriale » : Etendre le concept des équations stœchiométriques moléculaires, à énergie et masse constantes, aux stocks et flux d'exergie **redox** d'un grand territoire

### Avantages :

- Extrême précision
- Prise en compte des flux biogènes principaux des cycles biogéochimiques ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ , C, O,  $\text{H}_2$ ,  $\text{O}_2$ ,  $\text{CH}_2\text{O}$ , énergie libre, masse et exergie), extensible à **tous** les flux
- Distinction de la pression **p** et du volume **V** de l'exergie (**pV**) de la masse organique
- Cohérence avec la physique statistique et la thermodynamique (conservation de l'énergie et de la masse)
- Cohérence avec l'analyse Input/Output (égalité des entrées et sorties)

### Modèle de base

© R.Loiret, 2014					
Stœchiométrie du Glucose					
Formule chimique	Masses élémentaires (pour 1kg glucose)	Densité énergétique ou Pression ( <b>p</b> )	Volume massique ( <b>V</b> ) (inverse densité massique totale)	Exergie massique ( <b>pV</b> )	Densité massique (1/ <b>V</b> )
	g.kg-1	MJ.m3-1	m3.kg-1	MJ.kg-1	kg.m3-1
<b>Entrée de réduction (photosynthèse)</b>					
6 $\text{CO}_2$	1.465,71		TS	0,662	1,270
6 $\text{H}_2\text{O}$	599,99			1,508	2,043
<b>Energie Libre de Gibbs (G)</b>				<b>19,555</b>	
$\Sigma G + 6\text{CO}_2 + 6\text{H}_2\text{O}$	<b>2.065,70</b>	<b>71,965</b>	<b>0,30188</b>	<b>21,725</b>	<b>3,313</b>
<b>Sortie de réduction (photosynthèse)</b>					
$\text{C}_6$	400,01			13,663	668,086
$\text{H}_{12}$	67,14			7,863	1,339
$\text{O}_6$	532,85			0,066	2,679
$\Sigma \text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$	1.000,00	<b>14.512</b>	<b>0,00149</b>	21,592	672,104
6 $\text{O}_2$	1.065,70			0,132	2,679
$\Sigma \text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6 + 6 \text{O}_2$	<b>2.065,70</b>	<b>14.659</b>	<b>0,00148</b>	<b>21,725</b>	<b>674,783</b>
Variation des densités massiques et énergétiques (total sortie/total entrée)					
				203,70	203,70
<b>(1) <math>d(pV) = Vdp + pdV = 0</math></b>					
$d(pV) = (\text{Ln}(p2) - \text{Ln}(p1)) + (\text{Ln}(V2) - \text{Ln}(V1)) = -5,316 + 5,316 = 0 = \text{Cte}$					
<b>(2) <math>d(pV) = dp * dV = 1</math></b>					
$d(pV) = (14.659 / 71,965 = 203,70) * (0,00148 / 0,30188 = 0,0049) = 1 = \text{Cte}$					



# 3.2.2 -

# Actif écologique : Résultat 1

## Application territoriale du modèle de base

### Stœchiométrie territoriale des flux annuels de croissance (année n+1)



ACTIF ECOLOGIQUE (flux annuels)		STœCHIMETRIE ANNUELLE DU CYCLE DE CROISSANCE VEGETATIVE D'UN TERRITOIRE NATUREL																													
<b>Territoire de référence</b> Communes du Parc Naturel Régional des Préalpes d'Azur (PNRPA - 06) Année de référence 2000		<b>Croissance 1 : Destockage amidon, début de végétation et de photosynthèse</b> Transformation de l'amidon en glucose au réveil de la végétation + glucose de photosynthèse			<b>Croissance 2 : Production de jeunes fibres et bois dur</b> Transformation du glucose en <b>CHL*</b> (jeunes branches et fibres, tiges, troncs, racines,...)			<b>Croissance 3 : Végétation, floraison et fructification</b> Transformation du glucose en <b>GPL*</b> (jeunes tissus, feuilles, graines, fruits,...)			<b>Fin de végétation : Reconstitution du stock d'amidon</b> Transformation du solde de glucose en amidon		<b>Bilan des entrées/sorties</b> Somme des transformations		Soldes du bilan = Croissance nette de l'écosystème																
<b>Stœchiométrie massique (masse constante) : Production annuelle GPP, NPP et CH2O en Gg.an-1 (1E+9 grammes/an)</b>																															
0,5968																															
Eléments de la stœchiométrie territoriale		Entrées		Sorties		0,335		Coef. de Réduction*		0,262		Coef. d'Oxydation*		Entrées		Sorties		Soldes													
Carbone C		- 666		1.927		GPP*		- 645		586		NPPR*		- 505		254		NPPo*		- 777		666		- 2.593		3.434		840		NPP*	
Hydrogène H <sub>2</sub>		- 93		323				- 108		59				- 85		39				- 130		93		- 417		515		98			
Oxygène O		- 739		2.567				- 859		312				- 673		40				-1.035		739		- 3.307		3.659		352			
<b>Accumulation massique Σ E/S CH2O</b>		- 1.499		4.818				- 1.613		958				- 1.263		333				-1.943		1.499		- 6.317		7.608		1.291			
<b>Dont :</b>																															
Conso./prod. stock amidon : C <sub>6</sub> H <sub>10</sub> O <sub>5</sub>		- 1.499																				1.499		- 1.499		1.499		-		0,00	
Prod./conso. flux de glucose : C <sub>6</sub> H <sub>12</sub> O <sub>6</sub>				4.818				- 1.613						- 1.263						-1.943				- 4.818		4.818		-		-	
Production CHL* : C <sub>10</sub> H <sub>12</sub> O <sub>4</sub>										958																		958			
Production GPL* : C <sub>31</sub> H <sub>54</sub> O <sub>4</sub>																333												333			
Gaz carbonique CO <sub>2</sub>		- 4.622								215						920						407		- 4.622		1.542		-		3.080	
Humidité/Eau H <sub>2</sub> O		- 2.058								440						406						333		- 2.058		1.179		-		879	
Oxygène O <sub>2</sub>				3.360														397				296		- 296		3.360		-		2.668	
<b>Conservation de la masse Σ E/S</b>		- 8.179		8.179				- 1.613		1.613				- 1.660		1.660				-2.239		2.239		- 13.690		13.690		-		0,00	
<b>Stœchiométrie énergétique (bilan thermodynamique) : Production annuelle Exergie (dont Energie libre) en Pj.an-1 (1E+15 joules/an)</b>																															
0,335																															
Eléments de la stœchiométrie territoriale		Entrées		Sorties		0,335		Coef. de Réduction*		0,262		Coef. d'Oxydation*		Entrées		Sorties		Entrées		Sorties		Soldes									
Carbone C		-22,75		65,83				-22,03		20,03				-17,25		8,68		-26,55		22,75		- 88,58		117,29		28,71					
Hydrogène H <sub>2</sub>		-10,91		37,89				-12,68		6,92				-9,93		4,60		-15,28		10,91		- 48,80		60,32		11,52					
Oxygène O		-0,09		0,32				-0,11		0,04				-0,08		0,00		-0,13		0,09		- 0,41		0,45		0,04					
<b>Accumulation énergétique Σ E/S CH2O</b>		-33,75		104,04				-34,82		26,98		<b>d(pV)R*</b>		-27,27		13,29		<b>d(pV)o*</b>		-41,95		33,75		-137,79		178,06		40,27		<b>d(pV)*</b>	
<b>Dont :</b>																															
Conso./prod. stock amidon : C <sub>6</sub> H <sub>10</sub> O <sub>5</sub>		-33,75																				33,75		-33,75		33,75		-		0,00	
Prod./conso. flux de glucose : C <sub>6</sub> H <sub>12</sub> O <sub>6</sub>				104,04				- 34,82						- 27,27				-41,95						-104,04		104,04		-		0,00	
Production CHL* : C <sub>10</sub> H <sub>12</sub> O <sub>4</sub>										26,98																26,98				26,98	
Production GPL* : C <sub>31</sub> H <sub>54</sub> O <sub>4</sub>																13,29										13,29				13,29	
<b>Energie libre de Gibbs photosynthèse</b>		-67,53						7,51						13,40				7,88						-38,75				-38,75			
Gaz carbonique CO <sub>2</sub>		- 2,09								0,10						0,42				0,18				- 2,09		0,70		-		1,39	
Humidité/Eau H <sub>2</sub> O		- 1,08								0,23						0,21				0,18				- 1,08		0,62		-		0,46	
Oxygène O <sub>2</sub>				0,42																0,04				- 0,09		0,42		-		0,33	
<b>Conservation de l'énergie Σ E/S</b>		-104,46		104,46				-27,31		27,31				-13,92		13,92				-34,11		34,11		-179,80		179,80		-		0,00	
<b>Intensification énergétique (MJ/kg sec)</b>		22,52		21,59				21,59		28,17				21,59		39,88				21,59		22,52		21,81		23,40		-		31,19	
<b>* Abréviations</b>														<b>Données territoire</b>				<b>Version du :</b>													
Ggan-1 : Masse, unité = Giga grammes = milliard de grammes = 1000 tonnes/an														Surfa ce PNRPA				27 Février 2014													
Pjan-1 : Exergie, unité = Peta joule = million de milliards de joules/an														103.949 hectares				Thèse													
GPP (Gross Primary Production) = Production Primaire Brute de carbone														Stocks de carbone				Le Bilan													
NPP (Net Primary Production) = Production Primaire Nette, de carbone = NPPR+NPPo														Végétation				écologique													
GPP - NPP = Activité redox de l'écosystème dont respiration														Sol				© R. Lobet													
GPL : Glucides, lipides et protéines (jeunes tissus, feuilles, graines, fruits,...)														Gg ou Kt				2013 Certifié													
CHL : Cellulose, hémicellulose et lignine (jeunes branches et fibres, tiges, troncs, racines,...)														Gg ou Kt				Dépôt Copyright													
C10H12O4 : Aldéide conifériquique (lignine) = étalon <b>CHL</b>														4.677				7.854				France n°									
C51H94O6 : Margarine oléine (huile olive) = étalon <b>GPL</b>																		37981D3													
C6H10O5 : Amidon																															
CH2O : Matière organique totale (CHL, GPL, amidon), à différencier strictement des flux de carbone (GPP/NPP)																															
Coefficients de réduction et d'oxydation : Une proportion des stocks de carbone réduit et de carbone oxydé, du sol et de la végétation																															
d(pV) = d(pV)R + d(pV)o = Production annuelle (variation du stock) d'énergie biogéochimique de réduction et d'oxydation																															

# 3.2.3 -

# Actif écologique : Résultats 2

## Stocks et flux année n et n+1

Territoire de référence : Communes du Parc Naturel Régional Préalpes d'Azur (PNRPA - 06)										Surface (ha)	Population
Année de référence : 2000										103.949	100.164
Etat standard (masses sèches) de la biomasse (CH <sub>2</sub> O)						Etat naturel (masses humide) de la biomasse (CH <sub>2</sub> O)					
© R.Loiret - 2015	M	pV	p	V = pV/p	Em = pV/M	m	pV.m ****	p2 = p.m	V2 = V/m	Em2 = Em.m	M/V2
Stocks/flux de carbone du territoire	Masse	Exergie standard du territoire	Etalon pression	Volume standard	Exergie massique standard	Indice K <sub>a</sub>	D <sub>ET</sub> ****	Pression moyenne	Volume humide	Exergie massique moyenne	Densité massique CH <sub>2</sub> O
grammes (gC)	grammes	Joules (J)	J/m3 = Pa	m3	KJ/g	m	J.m ****	J/m3	m3	KJ/g	Kg/m3

## Actif écologique

### (1) Stocks année n

	pVR					DER						
CHL *	8,74E+12	1,43E+13	4,02E+17	2,29E+10	1,76E+07	28,17	0,26810	1,08E+17	6,14E+09	6,55E+07	7,55	218,04
GPL *	3,79E+12	5,60E+12	1,97E+17	3,12E+10	6,32E+06	35,23	0,31361	6,19E+16	9,78E+09	2,02E+07	11,05	277,64
	pVo					DEO						
Σ	1,25E+13	1,99E+13	5,99E+17		2,39E+07			1,70E+17		8,56E+07		
Moy.	pV			DET			7,00E+09			8,43		

### (2) Variation de stock = Flux de production de l'Ecosphère année n+1

	NPPR					d(pV)R **							ΔDER	
CHL	5,86E+11	9,58E+11	2,70E+16	2,29E+10	1,18E+06	28,17	0,26810	7,23E+15	6,14E+09	4,39E+06	7,55	218,04		
GPL	2,54E+11	3,33E+11	1,33E+16	3,12E+10	4,26E+05	39,88	0,31361	4,17E+15	9,78E+09	1,36E+06	12,51	245,30		
	NPP0					d(pV)0 **							ΔDEO	
Σ	8,40E+11	1,29E+12	4,03E+16		1,60E+06			1,14E+16		5,75E+06				
Moy.	NPP			d(pV)			ΔDET			7,00E+09			8,69	

### (3) Stocks année n+1

	pVR					DER						
CHL	9,32E+12	1,52E+13	4,29E+17	2,29E+10	1,87E+07	28,17	0,26810	1,15E+17	6,14E+09	6,99E+07	7,55	218,04
GPL	4,05E+12	5,93E+12	2,11E+17	3,12E+10	6,75E+06	35,49	0,31361	6,60E+16	9,78E+09	2,15E+07	11,13	275,60
	pVo					DEO						
Σ	1,34E+13	2,12E+13	6,40E+17		2,55E+07			1,81E+17		9,14E+07		
Moy.	pV			DET			7,00E+09			8,45		

\*CHL = Cellulose, Hemicellulose, Lignine GPL = Glucides, Lipide \*\* Résultats de la Stoechiométrie territoriale \*\*\* DES = Distance à l'équilibre statistique de la diversité structurale  
 \*\*\*\* pV.m = Joules.mètre (J.m) = DET = Distance à l'équilibre thermodynamique de la diversité biologique = distance de réduction (DER) + distance d'oxydation (DEO)

- **Méthodologie générale** de calcul du **passif** (ex Empreinte écologique) fondée sur des travaux antérieurs (Loiret, 2007, 2008, 2011b) : Application française pilote de la méthodologie **REAP** (Wiedmann et Barret, 2005)
- **Apport essentiel** du nouveau **passif** développé dans la thèse : Grande simplification et consolidation de la méthodologie **REAP**

### Programme EMPR-PNRs



Des comptes écologiques de la France  
aux comptes écologiques  
des collectivités territoriales françaises

Une application française pilote de la méthodologie « REAP\* », qui désagrège les comptes écologiques de la Nation jusqu'à l'échelle locale, par croisement avec la comptabilité nationale (TES).

**Démonstration méthodologique**  
(appliquée ici à l'Empreinte carbone)

&

**Résultats**  
Empreinte **carbone** & Empreinte **écologique**  
de la France et de collectivités territoriales de différents niveaux

Richard Loiret

Docteur en Economie Ecologique  
Laboratoire REEDS (UVSQ) 2010-2012

\* Ressources & Energy Analysis Program (Stockholm Environment Institute). Une méthode d'analyse Input/Output



### 3.3.2 -

# Passif écologique : Résultats

## 1 - TES monétaire territorial à 14 postes I/O

Parc Naturel Régional Préalpes d'Azur		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	Assainissement, voirie, gestion des déchets	Consommations intermédiaires	Consommation des ménages	ISBLM + APU	FBC	Exportations	Demande finale du territoire
NAATI4	TES14 M€ 1999	Agriculture	Elevage	Pêche, Aquaculture	Sylviculture et transformation du bois	Mise à disposition de l'énergie	Mise à disposition de l'eau	Mise à disposition des matières minérales	IAA et autres transformations de la biomasse agro-pastorale	Autres industries civiles	Bâtiment et travaux publics	Transports industriels et collectifs	Commerces et services marchands	Services récréatifs, socio-culturels et publics	Assainissement, voirie, gestion des déchets	Consommations intermédiaires	Consommation des ménages	ISBLM + APU	FBC	Exportations	Demande finale du territoire	
1	Agriculture	10,01	3,60	-	0,10	0,21	-	-	23,90	0,36	1,59	-	-	3,10	-	42,87	19,70	-	0,88	9,19	72,64	
2	Elevage	3,60	1,30	-	0,04	-	-	-	23,95	0,05	-	-	-	1,12	-	30,05	13,83	-	0,62	6,44	50,94	
3	Pêche, Aquaculture	-	-	0,01	-	-	-	-	1,56	0,06	-	0,02	0,00	0,76	-	2,41	5,56	-	-	0,73	8,69	
4	Sylviculture et transformation du bois	0,98	0,35	0,01	43,46	0,21	0,08	0,15	4,74	12,42	6,25	0,66	24,09	13,41	0,11	106,95	48,12	0,01	9,36	20,44	184,87	
5	Mise à disposition de l'énergie	3,17	1,14	0,48	2,57	48,40	0,47	0,46	4,39	20,15	4,61	15,13	20,10	15,26	0,31	136,66	86,55	0,01	1,83	12,97	234,37	
6	Mise à disposition de l'eau	0,46	0,17	0,02	0,11	0,18	1,34	0,01	0,45	0,69	0,13	0,07	0,62	1,89	0,03	6,16	4,99	-	-	-	11,15	
7	Mise à disposition des matières minérales	0,17	0,06	0,01	0,29	0,01	0,05	0,36	0,17	7,23	2,86	-	0,07	0,01	0,02	11,31	0,29	-	0,02	0,89	12,47	
8	IAA et autres transformations de la biomasse agro-pastorale	0,19	10,60	0,06	2,12	0,16	0,04	0,04	65,67	8,57	1,09	0,66	5,57	35,65	0,03	130,44	261,56	0,00	2,08	67,70	461,78	
9	Autres industries civiles	11,38	5,36	0,09	10,57	6,40	1,41	2,22	14,67	375,51	55,91	8,44	41,12	41,36	0,37	574,82	220,20	28,83	144,43	360,28	1.328,56	
10	Bâtiment et travaux publics	0,32	0,12	0,01	0,15	3,60	0,86	0,07	0,37	1,51	25,91	0,95	10,20	11,47	0,04	55,59	13,16	0,06	193,90	-	262,70	
11	Transports industriels et collectifs	0,05	0,02	0,02	1,77	1,59	0,30	0,11	2,18	5,92	1,41	30,21	24,82	8,04	0,18	76,61	32,01	2,50	0,17	24,38	135,67	
12	Commerces et services marchands	5,17	1,86	0,19	15,11	12,48	3,03	0,49	26,95	99,20	29,95	27,23	356,00	85,59	1,48	664,74	324,63	16,06	90,66	42,52	1.138,61	
13	Services récréatifs, socio-culturels et publics	0,17	0,44	0,01	2,54	1,90	0,26	0,10	2,63	10,11	2,39	4,39	54,72	48,18	0,35	128,20	201,70	514,31	3,21	54,15	901,57	
14	Assainissement, voirie, gestion des déchets	0,06	0,02	-	0,48	0,41	0,76	0,03	0,56	2,11	0,61	0,34	4,94	4,25	3,80	18,38	8,34	-	-	-	26,72	
<b>Consommations intermédiaires</b>		35,74	25,06	0,91	79,30	75,56	8,61	4,03	172,20	543,90	132,73	88,09	542,26	270,08	6,72	1.985	1.241	563,80	441,91	600,16	4.830,75	
Va production + transferts de branche		22,81	15,99	2,27	43,76	40,74	1,85	3,05	7,44	222,97	104,29	82,80	843,16	570,98	16,65	2.046	-	-	-	-	-	
Importations de biens		6,39	4,48	1,71	26,84	32,16	-	2,37	64,53	325,95	-	-	-	-	-	464	-	-	-	-	-	
Importations de services		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	25,79	39,38	33,97	-	99	-	-	-	-	-	
Va de la commercialisation		7,61	5,34	3,77	34,60	86,52	0,72	3,02	149,77	235,60	25,78	60,81	204,82	25,71	3,41	236	-	-	-	-	-	
<b>Produit final du territoire</b>		72,55	50,86	8,66	184,51	234,98	11,18	12,47	460,92	1.328,42	262,80	135,88	1.139,98	900,74	26,78	4.830,75	-	-	-	-	-	



## 2 - TES biophysique, reflet supposé du TES monétaire

NAATI4		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	Assainissement, voirie, gestion des déchets	Consommations intermédiaires	Consommation des ménages	ISBLM + APU	FBC	Exports (directs & indirects)	Demande finale (DF)	Dont déchets de la demande finale	Passif écologique (exercice) = DF - Exports
NAATI4	TeraJoules - PNRA 1999	Agriculture	Elevage	Pêche, Aquaculture	Sylviculture et transformation du bois	Mise à disposition de l'énergie	Mise à disposition de l'eau	Mise à disposition des matières minérales	IAA et autres transformations de la biomasse agro-pastorale	Autres industries civiles	Bâtiment et travaux publics	Transports industriels et collectifs	Commerces et services marchands	Services récréatifs, socio-culturels et publics	Assainissement, voirie, gestion des déchets	Consommations intermédiaires	Consommation des ménages	ISBLM + APU	FBC	Exports (directs & indirects)	Demande finale (DF)	Dont déchets de la demande finale	Passif écologique (exercice) = DF - Exports	
1	Agriculture	347,51	90,73	-	2,48	5,79	-	-	642,84	9,16	43,84	-	-	76,61	-	1.219	560	-	24,97	261,25	2.065	324	1.804	
2	Elevage	61,03	9,57	-	0,24	-	-	-	217,95	0,38	-	-	-	7,75	-	297	137	-	6,08	63,64	503	189	440	
3	Pêche, Aquaculture	-	-	0,43	-	-	-	-	11,26	0,34	-	0,08	0,01	3,83	-	16	37	-	4,82	58	20	53		
4	Sylviculture et transformation du bois	14,36	1,79	0,57	191,00	1,50	0,46	26,52	32,07	67,16	46,61	2,92	106,66	62,01	0,93	555	250	0,04	48,52	105,97	959	248	853	
5	Mise à disposition de l'énergie	164,93	48,48	38,70	107,11	2.150,72	20,08	97,21	193,87	861,63	206,78	631,90	839,63	640,80	14,42	6.016	3.810	0,44	80,39	571,01	10.318	661	9.747	
6	Mise à disposition de l'eau	100,88	34,75	3,72	22,67	38,16	280,97	1,89	94,19	143,35	27,96	14,30	129,08	394,58	5,34	1.292	1.047	-	-	2.339	26	2.339		
7	Mise à disposition des matières minérales	3,72	0,75	0,42	3,31	0,19	0,61	64,49	2,39	89,38	41,17	-	0,82	0,08	0,24	208	5	-	0,37	16,30	229	94	213	
8	IAA et autres transformations de la biomasse agro-pastorale	3,05	68,93	2,52	12,43	1,33	0,27	7,56	540,33	58,83	9,73	3,87	32,79	216,76	0,27	959	1.922	0,01	15,27	497,51	3.394	945	2.896	
9	Autres industries civiles	156,15	22,35	3,87	37,18	39,72	6,62	378,91	86,50	1.701,08	367,73	29,85	145,95	154,99	2,89	3.134	1.200	157,15	787,42	1.964,18	7.243	3.298	5.279	
10	Bâtiment et travaux publics	5,69	0,94	0,54	1,15	36,39	7,42	11,44	3,66	12,75	271,59	7,04	76,07	87,79	0,51	523	124	0,52	1.824,17	-	2.471	665	2.471	
11	Transports industriels et collectifs	0,92	0,17	0,80	16,83	19,45	3,23	19,00	25,97	62,39	17,70	288,33	237,20	78,42	2,45	773	323	25,17	1,69	245,98	1.369	151	1.123	
12	Commerces et services marchands	67,75	6,60	7,89	43,66	69,54	12,34	83,73	141,92	387,12	178,20	79,20	1.040,26	267,00	10,58	2.396	1.170	57,87	326,76	153,24	4.104	1.437	3.950	
13	Services récréatifs, socio-culturels et publics	2,45	2,19	0,43	10,84	13,22	1,43	17,00	17,53	53,49	17,55	18,85	235,76	217,08	3,00	611	961	2.450,42	15,30	257,99	4.296	935	4.038	
14	Assainissement, voirie, gestion des déchets	0,61	0,02	-	0,26	1,32	1,32	4,79	1,64	3,29	2,21	0,19	2,87	3,31	18,24	40	18	-	-	-	58	58	58	
<b>Production intermédiaire</b>		929	287	60	449	2.377	335	713	2.012	3.450	1.231	1.077	2.847	2.211	59	18.037	11.564	2.692	2.969	4.142	39.404	9.052	35.263	
<b>Imports (directs &amp; indirects)</b>		1.136	216	2	509	7.940	2.004	484	1.382	3.793	1.240	292	1.257	2.085	1	21.367	-	-	-	-	-	-	-	
<b>Production finale (dont imports directs)</b>		2.065	503	58	959	10.318	2.339	229	3.394	7.243	2.471	1.369	4.104	4.296	58	39.404	-	-	-	-	-	-	-	
<b>Dont déchets de la production intermédiaire</b>																	<b>Dont autres déchets de la DF</b>							
		384,39	30,04	35,39	43,48	244,23	14,88	678,15	503,74	848,83	478,80	49,95	314,77	210,10	32,24	3.869	2.263	627,93	985,24	1.307,06	9,052			

Bilan écologique (Version A : Fonctionnelle) Territoire : Communes du PNRPA, 1999	NAATI14														Population du Territoire : 100.164 habitants		
	Formules	Agriculture	Elevage	Pêche, Aquaculture	Sylviculture et transformation du bois	Mise à disposition de l'énergie	Mise à disposition de l'eau	Mise à disposition des matières minérales	IAA et autres transformations de la biomasse agro-pastorale	Autres industries civiles	Bâtiment et travaux publics	Transports industriels et collectifs	Commerces et services marchands	Services récréatifs, socio-culturels et publics	Assainissement, voirie, gestion des déchets	Totaux	Moyennes et ratios
Surfaces du territoire (CLC 2000 rapporté à la NAATI14)	(1)	6.702	19.784	-	63.849	-	120	47	498	55	-	-	4.651	8.243	-	103.949 Ha	1,038 Ha/habitant
<b>Production intermédiaire</b> (Prod. intérieure hors imports du TES14 exergie)	(2)	929	287	60	449	2.377	335	713	2.012	3.450	1.231	1.077	2.847	2.211	59	18.037 TJ	0,180 TJ/habitant
Surfaces théoriques du territoire réquisitionnées par la production intermédiaire	(3)	4.583	1.716	11	26.270	374	114	104	22.949	8.960	4.369	873	20.432	13.098	98	103.949 Ha	1,038 Ha/habitant
Tension de surface économique	(4) = (2)/(3)	0,203	0,167	5,679	0,017	6,362	2,945	6,860	0,088	0,385	0,282	1,233	0,139	0,169	0,602	-	0,174 TJ/Ha [2]
Productivité exergetique moyenne théorique des écosystèmes industriels	(5) = →	X	X	X	X		X	X	→ (5) = $\Sigma(1\&4 \& 6\&7)$ de (2) / $\Sigma(1\&4 \& 6\&7)$ de (3)							-	0,085 TJ/Ha [2]
<b>Passif écologique</b> (Prod. intermédiaire + imports - exports du TES14)	(6)	1.804	440	53	853	9.747	2.339	213	2.896	5.279	2.471	1.123	3.950	4.038	58	35.263 TJ	0,339 TJ/Ha [2]
<b>DSe</b> = Demande finale en surfaces économiques	(7) = (6)/(4)	8.900	2.626	9	49.866	1.532	794	31	33.033	13.708	8.771	910	28.350	23.918	97	172.547 eHa [3]	1,723 eha/habitant
<b>DSeg [1]</b> = Demande finale en surfaces équivalentes d'écosystèmes gérés	(8) = (6)/moy(5)	21.341	5.201	624	10.085	115.288	27.665	2.514	34.258	62.441	29.234	13.280	46.728	47.759	689	417.108 egHa [4]	4,164 egHa/habitant
Demande finale en hectares globaux (gha)	Calcul antérieur [6]	Note : Les gha sont des hectares écosystémiques industriels de productivité moyenne												<b>Empreinte écologique</b> 1999 (standard GFN), pour mémoire		501.491 gHa	5,007 gha/habitant
Taux de couverture du Passif écologique par les écosystèmes gérés	(9) = (1) / (8)													<b>Indice d'autonomie territoriale</b>		0,249	
<b>Actif écologique</b> (production d'exergie utile des écosystèmes naturels)	(10)													11.402 TJ.m	0,110 TJ.m/ha		
<b>DSb</b> = Demande finale en surfaces biologiques équivalentes	(11) = (6)/moy(10)													321.494 bioHa [5]	3,210 bioha/habitant		
<b>Taux de couverture du Passif écologique par l'Actif écologique</b>	(12) = →	→ (12) = (1) / (11) = (10) / (6)												<b>Indice d'écodéveloppement</b>		0,323	
[1] Ou Passif écologique en surfaces écosystémiques de production industrielle	[2] TJ/Ha ou 100MJ/m2 ou 100MN/m	[3] eHa = Ha économiques (selon tension de surface)	[4] egHa = Ha équivalents d'écosystèmes gérés	[5] bioHa = Ha équivalents d'écosystèmes naturels	[6] Loiret(2011c)												

C'est un bilan de comparaison des flux annuels, de l'actif et du passif

- **Indice d'autonomie territoriale** = Capacité (supposée) des *écosystèmes sous contrôle* de la collectivité à couvrir la totalité de ses besoins en l'état. C'est un équivalent de l'*Empreinte écologique*.
- **Indice d'écodéveloppement** = Taux de couverture du passif par l'actif écologique = Capacité (théorique) de l'*énergie utile* (en J.m) produite par le *territoire naturel* de la collectivité, à couvrir la totalité de ses besoins en l'état.

# 3.4.2 - Bilan écologique : Résultat 2 (version B, stoechiométrique)

A énergie et masse constantes, la  $D_{ET}$  et sa variation annuelle, un indicateur de synthèse, représenterait l'impact unifié de la quasi totalité des pollutions chimiques et autres dégradations humaines, relativement aux espaces naturels et à leur biodiversité.

Territoire de référence :		Masse	Exergie (pV)	Exergie massique	pression (p)	Volume (pV/p)	Surface (ha)	103.949	
Communes du Parc Naturel Régional des Préalpes d'Azur (PNRPA - 06)							Hauteur	Distance à l'équilibre structurale (DES)	
Période de référence : 1999-2000		Grammes	Joules	KJ/g - MJ/kg	J/m3 - Pa	m3	Profondeur	Base = p	
							m	Indice Ka (m)	
<b>Bilan écologique (Version B : stoechimétrique)</b>									
<b>(1) Actifs écologiques - Stocks de l'Ecosphère année n</b>									
Athmosphère	Exergie des matières biogènes	Σ	7,99E+15	6,36E+17	0,080	6,25E+04	1,02E+13	9,793	1,03E-11
Territoire (naturel)	Biomasse terrestre (CH2O)	Σ	7,11E+13	5,99E+17	8,430	7,00E+09	8,56E+07	0,082	1,29E-01
Hydrosphère	Exergie des matières biogènes	Σ	2,09E+17	9,95E+18	0,048	4,64E+07	2,14E+11	206,1	5,67E-06
	Biomasse aquatique (CH2O)	Σ	2,04E+13	1,43E+17	6,970	6,85E+09	2,08E+07	0,020	1,23E-01
Lithosphère	Exergie des matières biogènes	Σ	1,19E+19	2,81E+22	2,363	5,41E+09	5,20E+12	5,000	7,69E-02
	Hydrocarbures (CH2O)	Σ	2,50E+13	2,63E+17	10,51	1,99E+08	1,32E+09	1,269	1,04E-04
<b>Total Ecosphère</b>		Σ	1,21E+19	2,81E+22	2,321	1,80E+09	1,56E+13	15,000	<b>Des1</b> <b>0,1950</b>
<b>(2) Actif écologique - Flux de production de l'Ecosphère année n+1</b>									
Athmosphère	Energie libre de Gibbs (flux solaires) captée	Σ		-4,14E+16					
	Variation d'exergie des matières biogènes	Σ	-5,78E+13	-1,25E+15	0,022				
	<b>Total des sorties (flux)</b>	Σ	-5,78E+13	-4,26E+16	0,737				
Territoire (naturel)	<b>Total des entrées = Actif écologique (flux)</b>	ΣE	5,78E+13	4,26E+16	0,737				
<b>(3) Passif écologique - Flux de consommation de l'Anthrosphère année n+1</b>									
Transformation de l'exergie consommée									
Anthrosphère	Oxyd./méthan. biomasse & et hydrocarbures	CH <sub>4</sub> O	-1,09E+12	-1,10E+16	10,08				
	Consommations d'eau	H <sub>2</sub> O	-5,32E+13	-2,34E+15	0,044				
	Autres transformations de l'exergie	...	-9,30E+12	-2,19E+16	2,360				
	<b>Total des sorties = Passif écologique</b>	ΣS	-6,35E+13	-3,53E+16	0,555				
Exutoires de l'exergie transformée									
Athmosphère	Energie libre de Gibbs dissipée	Σ		1,05E+16					
	Variation d'exergie des matières biogènes	Σ	1,08E+12	5,05E+14	0,469				
Anthrosphère	Croissance urbaine	Σ	3,63E+12	1,09E+16	3,014				
Hydrosphère	Rejets de déchets chimio-organiques (boues d'épuration, ...)	Σ	5,70E+13	5,18E+15	0,091				
Lithosphère	Stockage de déchets (organiques, minéraux et chimiques)	Σ	1,82E+12	8,17E+15	4,500				
Ecosphère	<b>Total des entrées (urbanisation, émissions, rejets,...)</b>	ΣE	6,35E+13	3,53E+16	0,555				
<b>(4) Actifs écologiques - Stocks de l'Ecosphère année n + 1</b>									
Athmosphère	Exergie des matières biogènes	Σ	7,98E+15	6,36E+17	0,080	6,24E+04	1,02E+13	9,793	9,97E-12
Territoire (naturel)	Biomasse terrestre (CH2O)	Σ	6,93E+13	6,23E+17	8,991	7,28E+09	8,56E+07	0,082	1,35E-01
Hydrosphère	Exergie des matières biogènes	Σ	2,09E+17	9,95E+18	0,048	4,65E+07	2,14E+11	206,1	5,52E-06
	Biomasse aquatique (CH2O)	Σ	2,04E+13	1,43E+17	6,970	6,85E+09	2,08E+07	0,020	1,20E-01
Lithosphère	Exergie des matières biogènes	Σ	1,19E+19	2,81E+22	2,363	5,41E+09	5,20E+12	5,000	7,49E-02
	Hydrocarbures (CH2O)	Σ	2,10E+13	2,46E+17	11,71	1,87E+08	1,32E+09	1,269	8,91E-05
<b>Total Ecosphère</b>		Σ	1,21E+19	2,81E+22	2,32	1,80E+09	1,56E+13	15,000	<b>Des2</b> <b>0,1966</b>
<b>Σ des variations année n &amp; n + 1 = Energie, masse &amp; volume constants</b>		ΣΔ	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	<b>Δ Des</b> <b>0,0016</b>

Egalité des entrées/sorties

C'est un bilan des stocks après variation annuelle des flux

# 4.

## Conclusion, limites et perspectives

Le **Bilan écologique** est globalement devenu  
une reformulation complète,  
entièrement autonome,  
de l'**Empreinte écologique**

Avec différents types de résultats et autant  
d'indicateurs/indices susceptibles de « donner sens »  
à notre action sur les territoires ...

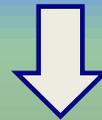


## 4.2 - Arrêt sur images : Joule.mètre et **valeur** économique

Si exergie = 10.000 et  $D_{ES} = 0,31 \rightarrow D_{ET} = 3100$



Si exergie = 10.000 et  $D_{ES} = 0,002 \rightarrow D_{ET} = 2$



Le **joule.mètre** ( $J.m \rightarrow D_{ET}$ ) prendrait en compte la production d'entropie (en + ou -) tout au long du processus de transformation nature  $\rightarrow$  économie

Ce « **serait** » une mesure *biophysique* fortement corrélable avec la valeur *monétaire*

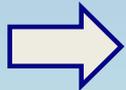
# 4.3 - Synthèse résultats 1 (suite) : Passif écologique

Avec son TES biophysique à 14 postes mesuré en **exergie**, et désormais calculable à n'importe quelle échelle territoriale, le passif écologique nous offre une batterie complète d'indicateurs écologiques pouvant constituer, en amont du Bilan lui-même, le **tableau de bord écologique** de suivi (**standardisé et comparable**) de toute collectivité territoriale.

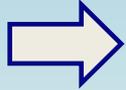
NAATI 4	NAATI4														Consommations intermédiaires	Consommation des ménages	ISBLM + APU	FBC	Exports (directs & indirects)	Demande finale (DF)	Dont déchets de la demande finale	Passif écologique (exergie) = DF - Exports
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14								
	Agriculture	Elevage	Pêche, Aquaculture	Sylviculture et transformation du bois	Mise à disposition de l'énergie	Mise à disposition de l'eau	Mise à disposition des matières minérales	IAA et autres transformations de la biomasse agro-pastorale	Autres industries civiles	Bâtiment et travaux publics	Transports industriels et collectifs	Commerces et services marchands	Services récréatifs, socio-culturels et publics	Assainissement, voirie, gestion des déchets								
1	347,51	90,73	-	2,48	5,79	-	-	642,84	9,16	43,84	-	-	76,61	-	1,219	560	-	24,97	261,25	2,065	324	1,804
2	61,03	9,57	-	0,24	-	-	-	217,95	0,38	-	-	-	7,75	-	297	137	-	6,08	63,64	503	189	440
3	-	-	0,43	-	-	-	-	11,26	0,34	-	0,08	0,01	3,83	-	16	37	-	-	4,82	58	20	53
4	14,36	1,79	0,57	191,00	1,50	0,46	26,52	32,07	67,16	46,61	2,92	106,66	62,01	0,93	555	250	0,04	48,52	105,97	959	248	853
5	164,93	48,48	38,70	107,11	2.150,72	20,08	97,21	193,87	861,63	206,78	631,90	839,63	640,80	14,42	6.016	3.810	0,44	80,39	571,01	10.318	661	9.747
6	100,88	34,75	3,72	22,67	38,16	280,97	1,89	94,19	143,35	27,96	14,30	129,08	394,58	5,34	1.292	1.047	-	-	-	2.339	26	2.339
7	3,72	0,75	0,42	3,31	0,19	0,61	64,49	2,39	89,38	41,17	-	0,82	0,08	0,24	208	5	-	0,37	16,30	2,29	94	213
8	3,05	68,93	2,52	12,43	1,33	0,27	7,56	540,33	58,83	9,73	3,87	32,79	216,76	0,27	959	1.922	0,01	15,27	497,51	3.394	945	2.896
9	156,15	22,35	3,87	37,18	39,72	6,62	378,91	86,50	1.701,08	367,73	29,85	145,95	154,99	2,89	3.134	1.200	157,15	787,42	1.964,18	7.243	3.298	5.279
10	5,69	0,94	0,54	1,15	36,39	7,42	11,44	3,66	12,75	271,59	7,04	76,07	87,79	0,51	523	124	0,52	1.824,17	-	2.471	665	2.471
11	0,92	0,17	0,80	16,83	19,45	3,23	19,00	25,97	62,39	17,70	288,33	237,20	78,42	2,45	773	323	25,17	1,69	245,98	1.369	151	1.123
12	67,75	6,60	7,89	43,66	69,54	12,34	83,73	141,92	387,12	178,20	79,20	1.040,26	267,00	10,58	2.396	1.170	57,87	326,76	153,24	4.104	1.437	3.950
13	2,45	2,19	0,43	10,84	13,22	1,43	17,00	17,53	53,49	17,55	18,85	235,76	217,08	3,00	611	961	2.450,42	15,30	257,99	4.296	935	4.038
14	0,61	0,02	-	0,26	1,32	1,32	4,79	1,64	3,29	2,21	0,19	2,87	3,31	18,24	40	18	-	-	-	58	58	58
	<b>Production intermédiaire</b>	287	60	449	2.377	335	713	2.012	3.450	1.231	1.077	2.847	2.211	59	18.037	11.564	2.692	2.969	4.142	39.404	9.052	35.263
	<b>Imports (directs &amp; indirects)</b>	1.136	216	2	509	7.940	2.004	484	1.382	3.793	1.240	292	1.257	2.085	1	21.367						
	<b>Production finale (dont imports directs)</b>	2.065	503	58	959	10.318	2.339	229	3.394	7.243	2.471	1.369	4.104	4.296	58	39.404						
		<b>Dont déchets de la production intermédiaire</b>														<b>Dont autres déchets de la DF</b>						
		384,39	30,04	35,39	43,48	244,23	14,88	678,15	503,74	848,83	478,80	49,95	314,77	210,10	32,24	3.869	2.263	627,93	985,24	1.307,06	9.052	

## 4.4 - Synthèse résultats 2 : Bilan écologique

- **Version A, fonctionnelle**, du bilan :



Indice d'autonomie territoriale



Indice d'écodéveloppement (territorial)

Avec une **tendance** pluriannuelle d'évolution de ces indices, les composantes d'un développement « **non écologique** » deviendraient toujours plus « **objectivables** »

- **Version B, Stœchiométrique**, du bilan :



Indicateur d'état du territoire :  $D_{ET}$  du territoire, et indice de variation annuelle **nette**, à énergie et masse constantes

Cette variation de  $D_{ET}$  devrait être à terme corrélable avec les grands déséquilibres de pression, volume, température, ... des compartiments **AHL** de la Biosphère

## 4.5 - Limites et **perspectives** de recherche

Le **bilan écologique** se présente comme une **proposition globale**, mais une construction encore « **brute de décoffrage** » dont **bien des aspects** présentent des limites sujettes à discussion.

Il nous offre pour autant d'intéressantes perspectives de recherche :

- **Hypothèses** (*concernant notamment la mesure de la biodiversité*) : A **vérifier**, valider, élargir à d'autres champs d'application
- **Concepts opératoires et principes de calcul** : A valider, améliorer, boucler, cadrer, standardiser, ...
- **Bilan fonctionnel** : A porter sur un moyen système de calcul
- **Bilan stœchiométrique** : Postulat à **vérifier** et valider, bilan à porter sur un grand système de calcul, ...
- **Explorer les chemins du développement écologique** : En se fondant sur un bilan standard et cohérent à **toutes** échelles territoriales

**Merci de votre attention**

Pour contacter l'auteur :

[richardloiret@free.fr](mailto:richardloiret@free.fr)

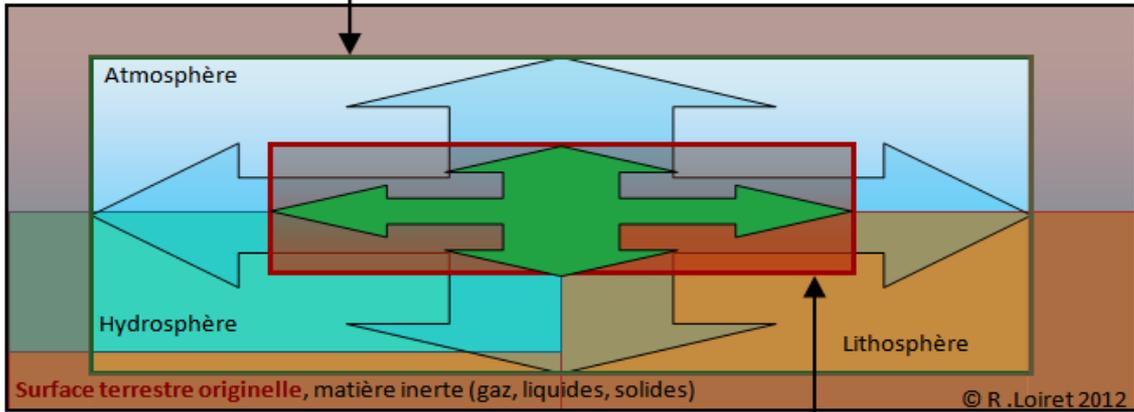
Pour télécharger la thèse  
(et ses cahiers de recherche associés) :

<http://hal.archives-ouvertes.fr/tel-01306180>

# ANNEXES

(en cas de besoin)

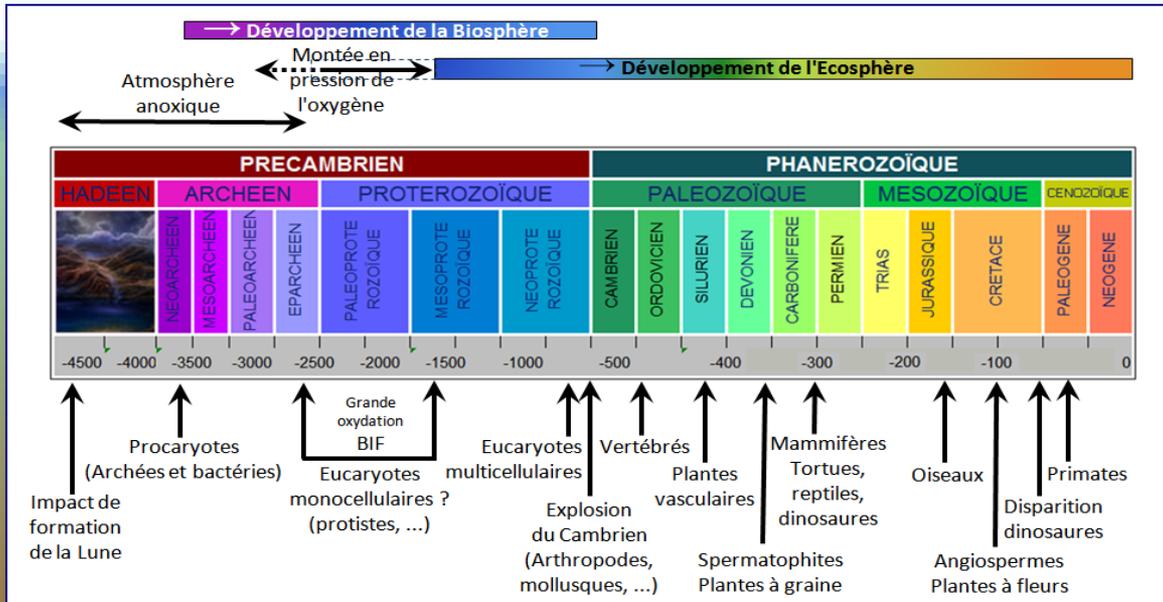
**Biosphère, domaine du vivant en expansion**  
 Champ thermodynamique de stabilité vitale, habitat de la **matière vivante** (procaryotes)



**Ecosphère, maison du vivant en expansion**  
 Champ thermodynamique d'existence vitale  
 Habitat des **organismes vivants autonomes** (eucaryotes uni et multicellulaires)

# Biosphère et Ecosphère selon Vernadsky\*

Des champs  
 « thermodynamiques »



\* Ceci est un recadrage général, car le terme **Ecosphère** (Lamont Cole, 1952) n'existait pas du temps de Vernadsky. Comme nous le montrons dans notre **cahier n°1**, il n'a cessé cependant de « désigner cette sphère » comme le **champ thermodynamique autonome des organismes vivants**, « inclus dans » mais « strictement différencié » de la **Biosphère** et sa matière vivante. La théorie de l'**Endosymbiose** et les travaux de **Lynn Margulis** sur l'Univers bactériel ont seul permis de nos jours d'établir formellement cette distinction.

# 1.3 - Quelle unité de compte **commune** à l'actif et au passif écologiques ?

N3

Une unité de mesure **biophysique** du **capital naturel**, mais laquelle ?

- Podolinsky (1880), pionnier de l'*analyse énergétique*, avait présenté à Marx et Engels sa
- Et Wackernagel (1994), sauf à le rapporter à des surfaces (gha), avait **pour l'essentiel** emprunté son modèle *énergétique* à Podolinsky (1880)

Synthèse de la théorie de l'accumulation énergétique & évolution 1870 -> 1970 (8)

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

Sources : Podolinsky (1880), Leach (1973), Bel et autres (1978), CNEEMA (1979)

Cette théorie met en exergue une *loi de productivité conjointe* de la nature\* et de l'homme.

\*Y compris les animaux domestiques !

## AN3-2 : Quelle unité de compte **commune** à l'actif et au passif écologiques ?

Doutons-nous des très faibles rendements énergétiques de l'agriculture chimique ?

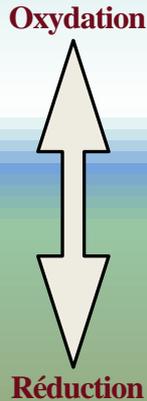
<b>Productivité énergétique de 12 exploitations agricoles de Bourgogne</b>	
<b>Type d'exploitation</b>	<b>Productivité énergétique totale</b>
Culture céréalière standard (mécanochimie)	8,8
Culture céréalière intensive (mécanochimie)	5,9
Culture céréalière + production de lait	4,7
Polyculture élevage (bovins)	4,2
Polyculture élevage (porcs)	1,6
Elevage bovins	0,8
Production de lait de vache	0,6
Production d'œufs	0,4
Elevage de lapins	0,3
Production de lait de chèvre	0,1
<i>Source : Risoud et Chopinet, 1999</i>	

# 2.1 -

# Quelle mesure de la biodiversité ?

Après les apports de l'école de Vernadsky, la question, simplifiée, devenait la suivante :

A énergie et masse constantes, qu'est-ce qui différencie l'énergie **biogéochimique** des organismes vivants, de l'énergie **géochemique (exergie)** des matières biogènes ?



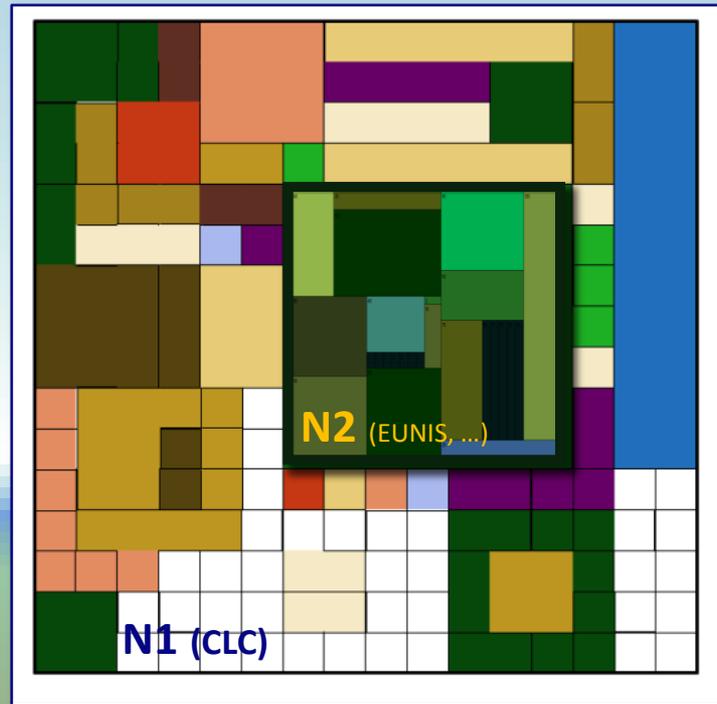
Stœchiométrie du Glucose					
Formule chimique	Masses élémentaires (pour 1kg glucose) g.kg-1	Densité énergétique ou Pression (p) MJ.m3-1	VOLUME massique (V) (inverse densité massique totale) m3.kg-1	Exergie massique (pV) MJ.kg-1	Densité massique (1/V) kg.m3-1
<b>Entrée de réduction (photosynthèse)</b>					
6 CO <sub>2</sub>	1.465,71		TS	0,662	1,270
6 H <sub>2</sub> O	599,99			1,508	2,043
<b>Energie Libre de Gibbs (G)</b>				<b>19,555</b>	
Σ G + 6CO <sub>2</sub> + 6H <sub>2</sub> O	<b>2.065,70</b>	<b>71,965</b>	<b>0,30188</b>	<b>21,725</b>	<b>3,313</b>
<b>Sortie de réduction (photosynthèse)</b>					
C <sub>6</sub>	400,01			13,663	668,086
H <sub>12</sub>	67,14			7,863	1,339
O <sub>6</sub>	532,85			0,066	2,679
Σ C <sub>6</sub> H <sub>12</sub> O <sub>6</sub>	1.000,00	<b>14.512</b>	<b>0,00149</b>	21,592	672,104
6 O <sub>2</sub>	1.065,70			0,132	2,679
Σ C <sub>6</sub> H <sub>12</sub> O <sub>6</sub> + 6 O <sub>2</sub>	<b>2.065,70</b>	<b>14.659</b>	<b>0,00148</b>	<b>21,725</b>	<b>674,783</b>
<b>Variation des densités massiques et énergétiques (total sortie/total entrée)</b>					
				<b>203,70</b>	<b>203,70</b>
<b>(1) d(pV) = Vdp + pdV = 0</b>					
$d(pV) = (\ln(p2) - \ln(p1) = 5,316) + (\ln(V2) - \ln(V1) = - 5,316) = 0 = \text{Cte}$					
<b>(2) d(pV) = dp * dV = 1</b>					
$d(pV) = (14.659 / 71,965 = 203,70) * (0,00148 / 0,30188 = 0,0049) = 1 = \text{Cte}$					

**Matières biogènes**  
= Energie **géochemique**  
= **Exergie pV**

**Matière vivante**  
= Energie **biogéochimique**

1 J = 1 Nm ⇒ 1 J/m<sup>3</sup> = 1 Nm/m<sup>3</sup> = 1 N/m<sup>2</sup> = 1 pascal / L'exergie en « joules » (pV) devient séparable en pression p et volume V

# Sous niveaux de la diversité structurale (N1, N2, ....)



# A – Données en exergie de l'écosystème marin de Mondego

Mesure énergétique et informationnelle de l'écosystème de Mondego (Portugal) sur la base de l'exergie CHL-GPL		1		2		3		4	
		Zone non eutrophiée		Zone d'eutrophisation intermédiaire		Zone eutrophiée avant crash d'algues		Zone eutrophiée après crash d'algues	
Exergie totale en KJ.m-2		1.455		95		463		71	
Exergie CHL-GPL / espèces en KJ.g-1	g.m-2	g.m-2		g.m-2		g.m-2		g.m-2	
Enteromorpha + Ulva	1,02	2,099	2,13	28,211	28,63	264,642	268,61	1,273	1,29
Other macroalgae	1,20	16,141	19,37	2,138	2,57	6,152	7,38	0,165	0,20
Z. noltii (total)	5,41	216,343	1.170,85	0,000	0,00	0,000	0,00	0,000	0,00
Anthozoa	2,91	0,003	0,01	0,000	0,00	0,000	0,00	0,000	0,00
Sipunculia	3,78	0,001	0,00	0,001	0,00	0,001	0,00	0,002	0,01
Nemertinea	3,98	0,005	0,02	0,003	0,01	0,005	0,02	0,001	0,00
Oligochaeta	4,23	0,128	0,54	0,031	0,13	0,010	0,04	0,002	0,01
Polychaeta	4,35	1,254	5,45	0,709	3,08	0,569	2,47	0,846	3,68
Mollusca	3,92	63,950	250,56	14,192	55,60	31,195	122,22	13,240	51,87
Crustacea	4,14	1,372	5,68	1,088	4,50	14,945	61,83	3,419	14,14
Insecta	4,30	0,007	0,03	0,006	0,03	0,009	0,04	0,001	0,00
Echinodermata	...	0,000	0,00	0,000	0,00	0,000	0,00	0,000	0,00
Pisces	5,80	0,000	0,00	0,006	0,03	0,034	0,20	0,000	0,00
Masse totale en g.m-2		301,303		46,385		317,562		18,949	
Indice Ka		0,646		0,379		0,361		0,520	
Hétérogénéité (entropie de Shannon) *		0,257		0,453		0,450		0,346	
Exergie structurale **		4,83		2,04		1,46		3,76	
		* $H' = - \sum p_i \log p_i$		** Exergie totale ramenée au gramme					
<b>Coefficients de corrélation des variations entre valeurs et indicateurs</b>									
1 - Entre exergie totale et exergie structurale :				0,6189					
2 - Entre Indice Ka et exergie totale :				0,7202					
3 - Entre Indice Ka et exergie structurale :				0,9896					
4 - Entre Indice Ka et Hétérogénéité (entropie H' de Shannon) :				-0,9974					
5 - Entre entropie de Shannon (H') et exergie totale :				-0,7400					
6 - Entre entropie de Shannon (H') et exergie structurale :				-0,9797					

L'indice H' est encore plus inapproprié

# B – D<sub>ET</sub> redox de l'écosystème marin de Mondego

Estuaire de Mondego (Portugal) Mesure de l'exergie CHL-GPL Données de synthèse Source des données de base : Jørgensen et autres, 2007	Unités	1	2	3	4
		Zone non eutrophiée	Zone d'eutrophisation intermédiaire	Zone eutrophiée avant crash d'algues	Zone eutrophiée après crash d'algues
Masse totale	g.m-2	<b>301,30</b>	<b>46,39</b>	<b>317,56</b>	<b>18,95</b>
<b>A -Redox</b>					
Exergie totale redox	KJ.m-2	1.454,64	94,59	462,82	71,21
Exergie massique redox *	KJ.g-1	4,83	2,04	1,46	3,76
Indice K <sub>a</sub> (redox)	m (mètre)	0,65	0,38	0,36	0,52
Distance à l'équilibre thermodynamique (DET)	KJm .m-2	939,01	35,86	166,98	37,01
DET massique *	KJm .g-1	3,12	0,77	0,53	1,95
<b>B -Réduction</b>					
Exergie totale de réduction	KJ.m-2	462,33	20,25	178,24	0,97
Exergie massique de réduction *	KJ.g-1	1,53	0,44	0,56	0,05
Indice K <sub>a</sub> (réduction)	m (mètre)	0,91	0,68	0,89	0,51
Distance à l'équilibre de réduction (DER)	KJm .m-2	418,86	13,70	158,17	0,50
DER massique *	KJm .g-1	1,39	0,30	0,50	0,03
<b>C - Oxydation (A-B)</b>					
Exergie totale d'oxydation	KJ.m-2	992,31	74,35	284,58	70,24
Exergie massique d'oxydation	KJ.g-1	3,30	1,60	0,90	3,71
Distance à l'équilibre d'oxydation (DEO)	KJm .m-2	520,15	22,16	8,81	36,52
DEO massique *	KJm .g-1	1,73	0,48	0,03	1,93

\* Le précédent ramené au gramme

Dans la proposition didactique que je t'ai proposé, la séquence serait à peu près de la manière suivante (les italiques bleu correspondent aux 3 points que tu affiches dans ton message):

## **0. La problématique générale (Introduction)**

### **I. La vision systémique avec ses racines en histoire de la pensée...**

*1.1 - Recherche technique et épistémologique sur l'énergétique du vivant*

*1.2 - Recherche de nature fondamentale sur l'actif écologique et la biodiversité*

### **II. La "solution" que toi-même tu proposes, pour intégrer énergie libre (exergie) et diversité dans un indice pour caractériser l'actif vivant sur un territoire.**

..

### **III. La démarche de Bilan écologique: comparaison d'actif et de passif pour un territoire.**

3.1 Le cadre général

3.2 Les enjeux d'estimation pour le/les territoire(s) de référence

*3.3 - Résultats généraux du Bilan écologique (actif et passif) pour le territoire*

### **(Et bien sûr une "Conclusion")**

NOTE: Le bloc (II) est très important car, il fournit la passerelle entre (I) qui est conceptuel, et (III) opérationnel et empirique

Cette séquence **I - II - III** est compatible avec ton schéma de 5 points de questionnement/réponse (tel que tu l'as envoyé dans ton dernier message). Il se peut, par exemple, que tes 5points s'exploite dans l'Introduction générale de ton exposé...

L'important est d'être explicite dans un exposé SIMPLE (mais correct!) sur ce que tu PORTES dans la thèse, sur chacun de ces trois blocs. Rien n'empêche, au final, de nuancer l'organisation, pourvu que la contribution sur chacun des trois blocs soit visible.