Grands cycles de la biosphère, systèmes de valeurs et opportunités d'économie circulaire à échelle territoriale : le cas de traitement des déchets ménagers au centre Ivry-Paris XIII.

Jean Pierre Doussoulin Bustos

▶ **To cite this version:**

Jean Pierre Doussoulin Bustos. Grands cycles de la biosphère, systèmes de valeurs et opportunités d'économie circulaire à échelle territoriale : le cas de traitement des déchets ménagers au centre Ivry-Paris XIII.. Economies et finances. Université Paris Saclay (COmUE), 2017. Français. NNT : 2017SACLV088 . tel-01723053

HAL Id: tel-01723053
https://theses.hal.science/tel-01723053

Submitted on 5 Mar 2018

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.

université PARIS-SACLAY

NNT : 2017SACLV088

UNIVERSITÉ DE VERSAILLES ST-QUENTIN-EN-YVELINES
université PARIS-SACLAY

Grands cycles de la biosphère, systèmes de valeurs et opportunités d'économie circulaire à l'échelle territoriale: le cas de traitement des déchets ménagers au centre Ivry-Paris XIII

Thèse de doctorat de l'Université Paris-Saclay
préparée à l'Université de Versailles Saint-Quentin-en-Yvelines

École doctorale n°578 Sciences de l'homme et de la société (SHS)
Sciences économiques

Thèse présentée et soutenue à Guyancourt, le 8 décembre 2017, par

M. Jean Pierre Doussoulin

Composition du Jury :

M. Bruno Oberle Professeur, École polytechnique fédérale de Lausanne	Président
Mme.Valeria Andreoni Professeur, Manchester Metropolitan University	Rapporteure
M. Joan Martinez-Alier Professeur émérite, Universitat Autonoma de Barcelona	Rapporteur
M. Jean-Marc Douguet Maître de Conférences, Université Paris Saclay	Examinateur
M. Martin O'Connor Professeur, Université Paris Saclay	Directeur de thèse
M. Stephane Quefelec Docteur, Consultant	Invité

Thèse de doctorat

université PARIS-SACLAY | ÉCOLE DOCTORALE Sciences de l'homme et de la société (SHS)

Titre : Grands cycles de la biosphère, systèmes de valeurs et opportunités d'économie circulaire à échelle territoriale: le cas de traitement des déchets ménagers au centre Ivry-Paris XIII

Mots clés : Économie circulaire, économie de l'environnement, cycles biogéochimiques, modèle input-output (I/O) et Sraffa

Résumé : Cette thèse se propose de tenter d'évaluer les opportunités de l'économie circulaire à l'échelle territoriale et d'y engager le rôle que jouent les cycles biogéochimiques, les systèmes économiques et les frontières de régulation institutionnelle entre l'économie et l'environnement au cours du projet de transformation du centre de traitement de déchets ménagers à Ivry-Paris XVIII.
Pour y parvenir, on peut adopter trois dimensions différentes. L'une, inspirée par la définition de biosphère proposée par Vernadsky, analyse le parcours des molécules comme l'azote dans la biosphère.
La deuxième, plus proche de la perspective privilégiée par Sraffa et Leontief, conduit à reconstituer une histoire de la pensée économique sur la base de l'interface entre l'économie et l'environnement.
La troisième, inspirée de la méthode dialectique de Moore, consiste à confronter les positionnements des acteurs autour de la régulation des frontières entre les processus d'appropriation de l'économie et la préservation de l'environnement.
Cependant, il convient de nuancer les résultats qui sont présentés par les dimensions d'analyse en soulignant que les taux de profit qui justifient un système de subventions des processus de recyclage et valorisation sont negatifs.
Enfin, cette thèse propose une analyse originale et pertinente pour critiquer les fondements d'une économie circulaire et leur justification comme solutions dans la gestion des déchets.

Title : The opportunities to build institutional and economic "value loops" which will internalize opportunities for circular economics: A case study of household waste management in centre Ivry – Paris XIII.

Keywords : circular economics; environmental economics; biogeochemical cycles; input-output model and Sraffa.

Abstract : This thesis attempts to evaluate the opportunities of the circular economy at the territorial scale and to engage the role of biogeochemical cycles, economic systems and the institutional boundaries between the environment and the economy, during the transformation project of the waste treatment center at Ivry-Paris XVIII.
To achieve this thesis, three different dimensions can be taken into consideration. The first one, inspired by the definition of biosphere proposed by Vernadsky, analyzes the pathways of molecules such as nitrogen in the biosphere. The second one, closer to the perspective supported by Sraffa and Leontief, leads to reconstruct a history of economics based on the interface between economy and environment.
The third one, inspired by Moore's dialectical method, is to confront the positioning of the actors around the regulation of the boundaries between the processes of appropriation of the economy and the preservation of the environment.
The results are presented by the analytic determination of dimensions that would be qualified by highlighting the negative profit rates and justifying a system of subsidies for recycling and recovery processes.
Indeed, the thesis explored and described an original and relevant method analyzing factors involved criticize the foundation of circular economy and their justification as a solution in waste management.

Université Paris-Saclay
Espace Technologique / Immeuble Discovery
Route de l'Orme aux Merisiers RD 128 / 91190 Saint-Aubin, France

Remerciements

Mes remerciements vont d'abord à mon directeur de thèse, le professeur Martin O'Connors. En tant que la première personne m'ayant suggéré de choisir l'économie circulaire comme domaine de recherche, ses points de vue et ses commentaires pertinents sur de nombreaux sujets transdiciplinaires m'ont largement permis d'enrichir mes recherches. Je vourdrais le remercier d'avoir accepté d'être mon directeur de thèse ainsi que pour ses encouragements continus pendant ces 4 annés de thèse.

Je voudrais aussi remercier a Yoann Verger, Clément Morlat, Mathias Bouckaert, Ettien Brou et Benoît Mougenot pour le temps qu'ils sont passé pour relire et corriger mes chapitres.

Permettez-moi d'exprimer ma plus profonde gratitude à mes parents par leurs dévouements désintéressées et leurs sacrifices consentis au Chili.

Finalement, je voudrais remercier ma femme, Verónica Soto, par sa pacience et force mentale qui ont été des supports indispensables à la longue marche que fut la préparation de cette thèse; ce qui demande non seulement une bonne condition intellectuel mais aussi un soutien constante au niveau psychologique. Tant le temps qu'elle a passé pour partage leur connaissances et relire mes chapitres souvent sentir profondément endetée envers elle.

Liste des abréviations

ADEME	Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie
Bauxaline	Coproduit issu de la fabrication d'alumine
C	Carbone
CaCO3	Carbonate de calcium
CH4	Méthane
C6H12O6	Formule brute de plusieurs Hexoses
CDIAC	Carbon Dioxide Information Analysis Center
CO	Monoxyde de carbone
CO2	Dioxyde de carbone
COP	Conférence des Parties
COV	Composés Organiques Volatils
COS	Carbonyle de sulfure
DMS	Diméthylsulfure
EROI	Energy Return on Energy Invested
FeS2	Pyrite
GDP	Gross Domestic Product
GES	Gaz à effet de serre
Gt	Gigatonnes
Gteq CO2	Giga tonnes équivalentes pétrole
GWh	Gigawatt-heure
HANPP	Appropriation humaine de la production primaire nette
H2	Hydrogène
H2S	Sulfure d'hydrogène
HNO3	Acide nitrique
H2SO4	Acide sulfurique
ICOP	Projet de l'agence nationale de la recherche
INRA	L'Institut national de la recherche agronomique
IRSTEA	L'Institut de recherche en sciences et technologies pour l'environnement et
LBE	Le laboratoire de biotechnologie de l'environnement
LISBP	Le laboratoire d'ingénierie des systèmes biologiques et des procédés
j.hab	Jours par habitant
MFA	Material flow accounting
mg P/L	Milligrammes de phosphore par litre
N2	Diazote
N2O	Protoxyde d'azote
NO3	Nitrate
NH3	Ammoniaque
NO2-	Dioxyde d'azote
Quadrillium	1 quad = 1015 Btu = 1.055 EJ
LSCE	Le Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement UVSQ
MIPS	L'indicateur que mesure l'intensité matérielle pour intensité de service
N	Azote
NH4	Ammonium
NOx	Oxydes d'azote
NH	Nitrogène mono hybride
OCDE	L'Organisation de Coopération et de Développement Économiques
ONU	L'Organisation des Nations Unies
O2	Oxygène
Pg	Petagrammes =10^15 grammes
pH	Potentiel hydrogène, mesure l'activité chimique des ions hydrogènes (H+)
P	Phosphore
S	Soufre
SO4-2	Sulfate
SO4	L'ion sulfate
Tg	Tétragrammes
Tms/an	Tonnes de matières sèches par an
UNESCO	United nations educational scientific and cultural organization
UVSQ	Université de Versailles Saint-Quentin-en-Yvelines

TABLE DES MATIERES

Liste des abréviations 3
Liste des figures 11
Introduction générale 15
Démarche et plan de la thèse 16
Problématique 17
Articulation de la thèse 18
Contexte de l'investigation empirique versus théorique 20
PARTIE I.- Représentation des grands cycles de la biosphère 21
De la biosphère de Vernadsky aux cycles biogéochimiques. 22
Une définition de la biosphère. 22
Les lois thermodynamiques qui régissent la biosphère 22
Les cycles biogéochimiques comme composant principal de la biosphère. 25
L'évolution des visions des cycles biogéochimiques : La transition de la biosphère vers la noosphère. 26
1. Représentation des grands cycles de la biosphère : de leur valeur physique à leur valeur nature écologique 27
1.1. Le cycle du carbone 30
1.1.1. Le cycle biologique du carbone 32
1.1.1.1. Le méthane : composant du cycle biologique du carbone. 35
1.1.2. Le cycle du carbone géologique 35
1.2. Cycle de l'azote 36
1.3. Cycle du phosphore 40
1.4. Cycle du soufre 42
1.5.1. Le soufre dans l'agriculture 43
1.5. Cycle d'eau : Cadre général 44
1.5.1. Le grand cycle de l'eau 44
1.5.2. Le petit cycle de l'eau 46
Conclusion de la partie I 49
PARTIE II.-Transition économie circulaire : de quoi s'agit-il ? 50
2. Approche biophysique dans l'économie circulaire 51
2.1 L'économie circulaire selon l'économie écologique 51
2.1.1. Processus et transferts dans les cycles de la biosphère 57

2.2 Conclusion du Chapitre 2 66
3. Approches de l'écologie industrielle : 4R 67
3.1 L'économie circulaire selon une vision industrielle. 67
3.1.1 Définition et arguments. 68
3.1.2 Ecoles de pensée autour de l'économie circulaire 71
3.1.3 Application de l'économie circulaire à l'Europe 75
3.2 L'économie circulaire en France : *Quoi et Comment ?* 81
3.2.1 *Quoi ?* : Définitions et typologies des déchets à Paris 83
3.2.2 *Comment ?* : Les opportunités d'économie circulaire dans la chaine de valeur en France. 92
3.3 Conclusion du Chapitre 3 100
4. Approches d'intégration hybride des cycles de la biosphère dans le modèle Input-Output 101
4.1. Quesnay et le *tableau économique* 101
4.2. Léon Walras et la notion d'équilibre général 102
4.2.1 Leif Johannson et l'équilibre général calculable 103
4.3. Wassily Leontief : la méthode entrée-sortie (*Input-Output* ou I/O) 104
4.3.1 La interpretation de la matrice inverse de Leontieff : les exigences directes et indirectes de travail..... 106
4.3.2 Le passage du tableau I/O aux système des equations de production jointe 109
4.4. Présentation des modèles input-output intégrant l'environnement 110
4.4.1 Les modèles I/O : Les numéraires monétaires 112
4.4.2 Les modèles I/O : les numéraires physiques et monétaires 113
4.5. Conclusion du Chapitre 4 125
5. La production jointe appliquée au parcours de molécules de la biosphère 126
5.1. Prise de perspective de la histoire de la pensée économique: production jointe 126
5.1.1. Le travail et la terre dans un modèle de production jointe : représentation Marxiste et Ricardienne 131
5.2. De la production jointe à l'économie politique Sraffiane 138
5.3. Le modèle de production jointe avec croissance économique 142
5.3.1. Le produit fondamental et non fondamental : Presentation de prix dans une hyperbole équilatère 145
5.4. Un modèle de production jointe et le bouclage des flux 149
5.5. La frontière technologique dans une modèle de production jointe 151
5.6. Conclusion du chapitre 5 154

Conclusion de la partie II 155

PARTIE III.- Institutionnalisme : Gouvernances sur les frontières entre la biosphère et l'économie. 156

6. Critiques contemporaines de l'écologie politique et débats autour de thèse portée par Jason Moore 157

6.1 Le changement des frontières entre la biosphère et l'économie : Qu'entend-on par limites planétaires ? 157

6.2 L'humanité dans la nature 160

6.2.1. Les systèmes socioécologiques (SSES) 160

6.2.2. Les visions des métabolismes 165

6.2.3. Les formes d'appropriation et d'accumulation 167

6.3 La frontière entre le capitalisme historique et la nature 168

6.3.1 Le capitalisme historique 168

6.3.2 Les matières premières pas chères ou *fours cheaps* 170

6.3.3 Le système du capitalisme cyclique ou d'accumulation. 172

6.3.4 La configuration du système capitaliste 172

6.3.5 Les limites du capitalisme dans la nature et le paradigme de l'économie circulaire 174

Conclusion de la partie III 176

PARTIE IV.- Approche de la modélisation économie circulaire: indicateurs 177

7. Les approches biophysiques du modèle Input-Output : Interface économie - environnement 179

7.1 Tableau Input-Output de l'environnement (EIO): Deux processus et deux commodités 179

7.2 Tableau EIO : Deux processus et deux commodités en considérant les déchets 181

7.3 Tableau EIO : Deux processus et deux commodités en considérant la production des déchets et le recyclage de la matière 183

7.4 Tableau EIO : Deux processus et deux commodités en considérant la production des déchets et le recyclage de matière et de l'énergie 185

7.5 Le bouclage dans le cycle de l'azote : une intégration par modélisation I/O 190

7.6 Conclusion du Chapitre 7 197

8. Les approches de la production jointe appliquées à une typologie des cycles 198

8.1 Les cycles et les cascades formalisées au travers de la production jointe. 202

8.2 Une typologie des structures cycliques ou assez cycliques 204

8.3 Une typologie des cascades : entropie versus néguentropie 217
8.4 Conclusion du Chapitre 8 235
9. Les démarches d'évaluations des cycles biogéochimiques. 236
9.1 Quelle représentation des cycles ? 236
9.2 Présentation des outils d'évaluation des cycles 242
9.2.1. Ecological footprint 246
9.2.2. Human Appropriation of Net Primary Production (HANPP) 248
9.2.3. Material Input per Unit Service (MIPS) 249
9.2.4. Le concept d'eau virtuelle 250
9.2.5. L'indice Biologique Global Normalise (IBGN) 250
9.2.6. Energy Return on Investment (EROI) 250
9.2.7. Material Flow Accounting (MFA) 252
9.2.8. Multi-Scale Integrated Analysis of Societal and Ecosystem Metabolism 254
9.2.9. Physical Input-Output Tables (PIOT) 255
9.2.10. Waste Input-Output (WIO) 257
9.2.11. National Accounting Matrix including Environmental Accounts (NAMEA) 257
9.2.12. Les indicateurs de bouclage de flux : Approche de Liu Yifang 259
9.2.13. Le modèle didactique de mesure des cycles biogéochimiques : Garry MacDonald 262
9.3. Application des outils physico-économiques adaptés pour mesurer les processus circulaires 264
9.4. Conclusion du Chapitre 9 273
10. Les outils d'évaluation d'une économie circulaire : Les démarches institutionnelles 274
10.1. Présentation des outils proposés par les institutions 274
10.1.1 Les indicateurs de l'ADEME 275
10.1.2 Global Reporting Initiative (GRI) 278
10.1.3 Impact Reporting and Investment Standards (IRIS) 279
10.1.4 Les indicateurs proposés par l'EEA (European Environment Agency) 280
10.1.5 Les indicateurs d'économie circulaire du Projet européen NETGREEN 281
10.1.6 Le système des indicateurs de l' EU-EMAS (Environmental management system) 282
10.1.7 La méthode pour mesurer le SROI (Social Return on Investment) 283
10.2. Les indicateurs d'économie circulaire proposés par la Fondation Ellen MacArthur 284
10.3. Un début des efforts : preparation et adaptation de la base données statistiques pour estimer une modélisation empirique 286

10.4. Conclusion du chapitre 10 287
Conclusion de la partie IV 288
PARTIE V.- Avenir de l'usine des ordures ménagères Ivry-Paris XIII : Quel projet pour demain, lorsque la conjoncture territoriale et les outils d'évaluation évoluent ?. 289
11. Identification et structuration du problème 291
11.1 Identifier le problème : du neuf côtés déchets 291
11.2 Décrire le contexte 291
11.3 Décrire le périmètre d'étude 292
11.4 Identifier les acteurs : quelles sont leurs positions ? 293
11.4.1. Difficultés liées à la coordination des acteurs du projet 294
11.5 Structurer les enjeux de performance 295
11.6 Identifier des variations du modèle 297
11.7 Choix de la méthode et convention pratique particulière 298
11.8 Conclusion du Chapitre 11 299
12. Un diagnostic du système. 300
12.1 Les systèmes de valeur dans l'economie circulaire : les quatre variations didactiques 301
12.2 Indicateur d'économie circulaire de métabolisme territorial 309
12.3 Actions identifiées pour les acteurs de la gouvernance 312
12.4 La mise en place du changement de cas d'étude : Le rapport des forces économiques sur les frontières de gouvernance. 317
12.5 Mise en place pratique du changement de scénario 318
12.6 Conclusion du Chapitre 12 319
13. Présentation des résultats : systèmes de valeur et appropriation du capital urbain…. 321
13.1 La structure d'un modèle de production jointe 323
13.1.1. Définition physique du système et de la théorie de la valeur 323
13.2 Caractérisation d'une économie urbaine : l'exemple de l'incinération et du compostage du déchet…. 324
13.2.1. Il était une fois un type d'économie : un modèle de mis en décharge du déchet 326
13.2.2. Un modèle d'incinération du déchet 330
13.2.3. Système de la valeur avec coût d'entretien de l'incinérateur 334
13.2.4. Un modèle de compostage du déchet 337

13.2.5. Système de la valeur et taux de rendement inégaux 343
13.3 Indicateurs d'économie circulaire : Ellen MacArthur et Yifang 346
13.3.1. Première variation : Mise en décharge 347
13.3.2. Deuxième variation : Incinération du déchet. 348
13.3.3. Troisième variation : Compostage du déchet urbain 349
13.4 Conclusion 351
Conclusion de la partie V 355
Conclusion de la thèse 357
PARTIE VI : Synthèse 364
VERSION FRACAISE 365
ENGLISH VERSION 373
Perspective de recherche 382
ANNEXE 383
I.A : Le cycle du Carbone 384
I.B : Le cycle de l'azote 385
I.C : Le cycle du soufre 385
I.D : Le cycle de l'eau 387
II.A : Le modèle *Fund-Flow* et les phases des processus 389
III.A : Les secteurs prioritaires pour une économie circulaire 389
III.B : L'enquête en ligne sur l'économie circulaire à l'Université de Lorraine 390
III.C : Base des données biophysiques et des flux de matières. 390
III.D : L'analyse SWOT appliqué à la gestion des déchets ménagers 391
III.E : Codes des déchets 392
IV.A : Evolution des modèles input-output de l'environnement 393
VI.A : Grille de lecture historique de Fourth cheaps 394
VII.A : Wold-systems theorie: Le concept du système monde développé par Braudel et Wallerstein 397
VIII.A : Matlab Integrated Development Environment (IDE) 399
VIII.B : Code Matlab des flux et des cascades 401
VIII.C : Structure des cycles et cascades en ePLANETe 410
IX.A : Les indicateurs du modèle didactique. 414
X.A : Les indicateurs de l'ADEME 415
X.B : Les indicateurs de la GRI 422

X.C : Les indicateurs d'IRIS 425
X.D : Les indicateurs de l'EEA 426
X.E : Les indicateurs du projet NETGREEN 427
X.F : Les indicateurs de l'EU-EMAS 427
X.G : Les indicateurs du SROI 427
XII.A : Code Matlab 428
XII.B : Résultats calcule Matlab 430
XII.C : Indicateur de circularité de Yifang CL (%) 434
XII.D: Indicateurs de circularité de la Fondation Ellen MacActhur. 436
XII.E : Annexe case spéciale économie dans la biosphère 438
XIII.A : Tableau intrants (A) et sorties (B) décomposable 442
XIII.B : Code Matlab hyperbole 444
XIII.C : Vecteur de prix relatif et d'activite 445
XIII.D : Grille de lecture des *Fourth cheaps* et de production jointe 447
XIII.E : Indicateur d'économie circulaire 448
BIBLIOGRAPHIE 450

Liste de figures

Figure -A : Le système Terre....27
Figure -B : L'actif et le passif....29
Figure 1 : L'évolution des boucles de la biosphère....24
Figure 1.1.1 : Cycle du carbone : Vision biochimique....31
Figure 1.2.1 : Cycle de l'azote : Vision biochimique....36
Figure 1.3.1 : Cycle de phosphore....40
Figure 1.4.1 : Nombre d'oxydation du soufre....42
Figure 1.5.2.1 : Le petit cycle d'eau....46
Figure 2.1.1 : Cascade de l'azote....52
Figure 2.1.1.2 : La notion de réversibilité et d'irréversible au cycle de l'hydrogène....53
Figure 2.1.1.3 : L'économie et la biosphère....56
Figure 2.1.1.4 : La cascade de l'azote dans les milieux naturels....59
Figure 2.1.1.5 : La cascade de l'azote dans l'agriculture....61
Figure 2.1.1.6 : La cascade de l'azote industriel et urbain....63
Figure 2.1.1.7 : Le cycle de l'azote dans l'agriculture....65
Figure 3.1.1.1 : Changement de paradigme : De l'économie linéaire à l'économie circulaire....68
Figure 3.1.1.2 : Le passage d'un flux linéaire vers un flux circulaire....69
Figure 3.1.1.3 : Les 4R. 70
Figure 3.1.2.2 : Cradle to cradle - Certified. 74
Figure 3.1.4.1 : La hiérarchie des usages de Zero Waste. 77
Figure 3.2.1 : Les 7 piliers de l'économie circulaire 81
Figure 3.2.1.1 : Organisation territoriale de la collecte d'ordures ménagères à Paris. 83
Figure 3.2.1.2 : Les types de déchet du BTP et les exemples. 84
Figure 3.2.1.3 : Typologie de biodéchets. 86
Figure 3.2.1.4 : Typologie de traitement de biodéchets....87
Figure 3.2.1.5. : La répartition des gisements de biodéchets selon les secteurs d'activités....88
Figure 3.2.1.6 : La répartition des gisements de bois en 2012. 88
Figure 3.2.1.7 : Les relations entre les acteurs : dispositif pour les TLC des ménages....91
Figure 3.2.2.1 : Les opportunités d'économie circulaire en France. 93
Figure 3.2.2.2 : Les 5 chaines de valeur de l'économie circulaire....94
Figure 3.2.2.3 : La chaine de valeur de produits écoconçus....95
Figure 3.2.2.4 : La chaine de valeur de l'économie collaborative....96
Figure 3.2.2.5 : La chaine de logistique inverse....96
Figure 3.2.2.6 : La chaine des produits réemployés et déchets réutilises. 97
Figure 3.2.2.7 : La chaine de l'économie de la fonctionnalité. 98
Figure 3.2.2.8 : Les chaines de valorisation des déchets. 99
Figure 4.1.1 : Le tableau économique de Quesnay....102
Figure 4.2 : L'équilibre au sens de Walras 103
Figure 4.3.1 : Le tableau des entrées et sorties. 105
Figure 4.3.1.1 : Formulation algebraique de la matrice de transactions du modele I/O 107
Figure 4.3.1.2 : Reformulation algebraique de la matrice de transactions du modele I/O 108
Figure 4.3.1.3 : Matrice de transactions et vecteur des coefficients de travail....109
Figure 4.4.2.6 : Modèle WIO 120
Figure 4.4.2.A : Relations biophysique entre la région d'Auckland et le reste du monde....124
Figure 5.5.1 : Changement dans le niveau d'activité : Variation de la technologie....151
Figure 6.1 : L'*actif/passif* vers le concept du *système-monde*....158
Figure 6.2.1. Réalisme et Constructivisme....164
Figure 7.4.2 Schéma des fluxes circulaires selon modèle I/O 189

Figure 8 : Représentation de cascade et de cycle 200
Figure 8.1.1 : Typologies des flux de matière et d'énergie 203
Figure 8.2.1 : La variation d'énergie libre de Gibbs 204
Figure 8.2.2 : Définition graphique du système 2x2 206
Figure 8.2.3 : Définition graphique du système 3 processus et 3 transferts 207
Figure 8.2.4 : Définition graphique du système 2x2 avec surplus 208
Figure 8.2.5 : Définition graphique du système 3 processus et 3 transferts avec surplus 210
Figure 8.2.6 : Flux circulaire d'une combinaison de deux processus du grand cycle et moyen cycle..... 211
Figure 8.2.7 : Les processus et les transferts dans le logiciel ePLANETe 212
Figure 8.2.8 : Système avec surplus, entropie, sans polluants, avec des intrants primaires. 213
Figure 8.2.9 : Système sans surplus, polluants et les intrants primaires 215
Figure 8.3.1 : Définition graphique du système 2 processus et 1 transfert 217
Figure 8.3.11 : Cadre irréversible d'une structure en cascade 232
Figure 8.3.2 : Définition graphique du système 3x3 en cascade 219
Figure 8.3.3 : Cascade avec production jointe avec intrants, surplus et déchets 221
Figure 8.3.4 : Système 3x3 avec production jointe 222
Figure 8.3.5 : *Entropie versus néguentropie* 224
Figure 8.3.6 : Cascade avec production jointe, réversion d'entropie (*néguentropie*) et polluants 225
Figure 8.3.7 : Cascade avec production jointe, réversion d'entropie mais sans polluants 227
Figure 8.3.8 : Système 3x3 avec production jointe, réversion d'entropie mais sans polluants 228
Figure 8.3.9 : Cascade avec production jointe, réversion d'entropie (matière-énergie) 230
Figure 8.3.9.A : Système de cascade avec production jointe, réversion d'entropie (matière-énergie.... 231
Figure 9.1.1 : Cycle du carbone (*Actif-Passif*) 237
Figure 9.1.2 : Cycle de l'azote (*Actif-Passif*) 238
Figure 9.1.3 : Cycle de phosphore (*Actif-Passif*) 239
Figure 9.1.4 : Cycle du soufre (*Actif-Passif*) 240
Figure 9.1.5 : Cycle d'eau (*Actif-Passif*) 241
Figure 9.2.1 : Les méthodologies en fonction de leur objectif (*Actif-Passif*) 243
Figure 9.2.1.1 : trois groupes d'empreinte écologique 246
Figure 9.2.1.2 : Méthode de Calcul de l'empreinte écologique 247
Figure 9.2.1.3 : Situation des émissions de l'année 2014 248
Figure 9.2.12.1 : Cascade sans réversion du modèle Yifang (2007). 259
Figure 9.2.12.2 : Cascade avec réversion du modèle Yifang (2007) 260
Figure 9.2.13 : La méthodologie d'Ecotime 262
Figure 9.2.7.1 : Le métabolisme social 253
Figure 9.2.8.1 : La méthode d'analyse Multi-Echelles (MuSIASEM). 255
Figure 9.3.1 : Les processus circulaires 264
Figure 9.3.2 : Les processus circulaires dans la conception, la fabrication et la distribution 266
Figure 9.3.3 : Les processus circulaires dans l'usage 267
Figure 9.3.4 : Les processus circulaires dans l'entretien et la réparation 268
Figure 9.3.5 : Les processus circulaires de réutilisation, de redistribuer et de revente 269
Figure 9.3.6 : Les processus circulaires comme le remettre à neuf et la remanufacture. 270
Figure 9.3.7 : Les processus circulaires comme le recyclage. 271
Figure 9.3.8 : Les processus circulaires de représentation d'un produit comme un service 272
Figure 9.4 : Les cinq sujets d'étude 282
Figure 9.5 : Bouclage de flux de l'indicateur d'Yifang (*CL*) 309
Figure 9.6 : Bouclage de flux de l'indicateur de la fondation Ellen MacArthur (*MCI*) 311
Figure 9.7 : L'arbitrage entre retour sur la nature (r), retour sur force de travail (w) et retour sur l'économie capitaliste (π) 321
Figure 9.8 : Circuit des flux pour l'incinération du déchet 348

Figure 9.9 : Circuit des flux pour le compostage du déchet.....349
Figure I.A.I : CO_2 immobilisée dans l'océan comme CaCO3 384
Figure I.A.II : La photosynthèse, la respiration et le stockage dans la lithosphère. 384
Figure I.B.I : L'ammoniac d'origine agricole.....385
Figure I.C.I : Émissions de SO_2 dans l'air en France métropolitaine 385
Figure I.C.II : La désulfuration par lavage des fumées. 386
Figure I.C.III : Le cycle de soufre dans l'agriculture.....386
Figure I.D.I : Quantité globale de l'eau 387
Figure I.D.II : La temporalité du cycle de l'eau.....387
Figure I.D.III : Quel sont les usages d'eau ? 388
Figure I.D.IV : Les utilisations de l'eau dans la production.....388
Figure III.3 : Codes des déchets selon le code de l'environnement. 392
Figure IV.A : L'évolution de la méthode I/O 393
Figure VIII.C.I : Cycle de l'azote dans l'agriculture en utilisant ePLANETe.....410
Figure VIII.C.II : Processus1 de l'azote dans les prairies en utilisant ePLANETe 411
Figure VIII.C.III :Transferts 1-2 dans le foin en utilisant ePLANETe.....411
Figure VIII.C.IV : Processus 2 d'élévage de bovin en utilisant ePLANETe.....412
Figure VIII.C.V : Transferts 2-1 de l'azote des déjections bovines en utilisant ePLANETe.....412
Figure VIII.C.VI : Les indicators KIKs.....413

Introduction générale de la thèse

Introduction générale

CETTE THESE s'inscrit dans la continuité des travaux initiés par de nombreux scientifiques, consacrés à la question des limites d'une exploitation de ressources, de la réutilisation des déchets et cherchant à rendre le fonctionnement des activités humaines compatible avec celui de la biosphère.

En réponse à ce besoin d'outils plus holistiques qui permettent de mieux couvrir la complexité de cycles de la biosphère, la littérature scientifique met l'accent sur certains concepts concernant :

1. L'émulation des écosystèmes naturels.
2. Les parcours des nutriments dans les cinq royaumes (Margulis *et al.* 1987).
3. La création de valeur dans les cycles et les cascades biogéochimiques.

Pour explorer ces concepts, nous examinons, dans l'état de l'art, une approche physico, économique et institutionnelle en partant de la mise au point méthodologique par Vernadsky (1930), Sraffa (1960) et Moore (2015). L'objectif est de montrer la contribution que la modélisation économique peut apporter à la compréhension des principes d'entropie et d'irréversibilité des grands cycles biogéochimiques. Cette démarche consiste à étudier les aspects cycliques des parcours des molécules dans les frontières entre la biosphère et l'économie.

La première et la deuxième partie visent à vérifier si les grands cycles biogéochimiques suivent un parcours circulaire. Trois méthodes sont ici utilisées. La première repose sur une étude de bouclage de flux de carbone, azote, phosphore, souffre et l'eau comme numéraires et classe ces éléments en différents systèmes ou cycles. La deuxième étudie le concept d'économie circulaire et la méthodologie économique appliquée à l'analyse des cycles. La troisième critique le processus d'expansion et appropriation économiques de la biosphère qui justifie une économie circulaire.

La troisième et la quatrième partie de cette thèse classifient et analysent les outils d'évaluation de l'économie circulaire dans une vision systémique. Dans ce sens, l'économie circulaire est un sujet ambitieux. En effet dans le domaine thermodynamique il est assez impossible de créer un zéro déchet comme dans une économie fermée en boucle (Clift *et al,* 2011). Donc, ce bouclage fait la distinction entre les systèmes biologiques et les systèmes industriels. Les écosystèmes biologiques ne sont pas fermés comme est envisagé pour les systèmes industriels, les boucles dans les systèmes naturels s'étendent sur des échelles spatiales et temporelles (Tennan *et al,* 2015). Dans ce système, les flux d'énergie sont aussi importants que les flux de matières. Le rythme des flux de matière, énergie et les effets potentiels de rebond sont importants. Ces parties seront consacrées également à la présentation de différentes méthodes d'analyse économique de l'environnement : modélisation input-output (I/O) et modélisation de production jointe. Elle va permettre d'explorer les limites de la modélisation (I/O) et constituer un préalable à l'exploration des usages et extensions de la production jointe par rapport à la gouvernance asymétrique sur les frontières entre la biosphère et l'économie (Kleinod, 2017).

La cinquième et la sixième partie discutent les opportunités de bouclage de flux de la matière et de l'énergie dans le traitement des ordures ménagères comme exemple d'une économie circulaire. Les

variations ou alternatives de traitement seront analysés du point de vue économique, biophysique et institutionnel. Pour illustrer ce bouclage de flux, cette partie sera consacrée au cas d'étude de l'usine de traitement des ordures ménagères Ivry-Paris XIII pour explorer des représentations des systèmes de la valeur dans les trois variations du cas d'étude. Elle présente également un cadre méthodologique visant à intégrer l'approche de bouclage des grands cycles à un modèle hybride en unités monétaires et unités physiques, ce cadre guidant le développement d'un système de la valeur avec des indicateurs qui permettent de mesurer les flux circulaires ou en cascade des cycles.

Démarche et plan de la thèse

La première année de thèse a été consacrée de façon globale à la recherche d'informations, la construction de la problématique et l'élaboration des hypothèses. Dans le détail, nous avons effectué une recherche bibliographique sur les trois angles d'analyse des opportunités d'économie circulaire, c'est-à-dire, la viabilité technique et économique des projets d'économie circulaire, les enjeux institutionnels et biophysiques de la gestion collective de ressources environnementales.

Comme cela a été récemment proposé par le WBCSD leadership programme (2016), l'économie circulaire est un champ de recherche émergeant qui a du mal à trouver sa place dans la classification des sciences : les différentes conceptions de l'économie circulaire, déterministe ou possibiliste, humaine ou technique, mettent ce champ de recherche en équilibre instable entre sciences exactes et sciences sociales. En interpellant la notion de territoire, l'économie circulaire étend ses frontières vers la géographie humaine et l'économie politique. Si l'économie circulaire est pensée comme projet d'aménagement durable du territoire en replaçant la notion d'économie linéaire au cœur de ses préoccupations, il sera utile de s'interroger sur la pertinence et le potentiel d'innovation d'un rapprochement disciplinaire entre l'économie et l'écologie. En nous appuyant sur ces rapprochements disciplinaires, nous travaillerons donc avec une notion de territoire qui recouvre trois dimensions différentes, mais complémentaires (Laganier *et al*, 2002) :

-une dimension matérielle, dans laquelle le territoire est conçu comme support physique.

-une dimension organisationnelle, où le territoire et ses frontières sont définis par les acteurs.

-une dimension identitaire, où le territoire correspond à la manière dont les acteurs se l'approprient à travers le concept de la valeur.

Durant la seconde année de recherche, nous avons fait l'analyse des systèmes de la valeur associée en utilisant le modèle de flux de matières (I/O multi secteur) et de production jointe. Dans une logique circulaire, cette quantification a plusieurs objectifs : établir une vision synthétique des différents indicateurs du fonctionnement du territoire du point de vue de la consommation de matières, et favoriser la construction d'un cadre d'analyses. Celle-ci permettra, d'un côté, analyser le bouclage de flux physiques et d'identifier des pistes d'amélioration des performances économiques et d'un autre côté, de comparer consommation et recyclage des ressources sur le territoire afin de mieux comprendre les processus sous-jacents – institutionnels, économiques, environnementaux – et les enjeux propres au territoire.

Dans la troisième année de thèse, nous voulons mettre en place une étude de cas. Le modèle permet de comprendre les systèmes de la valeur et les principes de la gouvernance des frontières entre l'économie et l'environnement. Cette démarche donne notamment une vision analytique des alternatives de gestion des déchets à travers la déclinaison des pratiques industrielles dans les usages municipaux, agricoles et domestiques qui permet le bouclage de flux du métabolisme urbain et industriel.

Problématique

Le territoire apparaît comme transversal aux différents enjeux, tantôt considérés comme substrat physique avec un système complexe de flux de matières (Fischer-Kowalski, 1998 ; Haas, 2011), un milieu naturel et un métabolisme social ou un système d'acteurs territorialisés (Wolman, 1965; Ayres *et al.* 1968, 1969; Neef, 1969; Boyden, 1970; Meadows *et al.*1972; Daly, 1973 ; Fischer-Kowalski, 1997). Ainsi nous posons comme problématique et fil conducteur de ce travail de recherche, l'existence d'un processus de co-construction entre une dimension matérielle et biophysique, une dimension organisationnelle et réglementaire et finalement une dimension qui exprime la relation socio-économique d'appropriation de la valeur (Moreau *et al*, 2017), lesquelles permettent d'explorer les opportunités d'économie circulaire aux échelles territoriales.

Adoptant une posture intégrative, nous posons comme première hypothèse que les systèmes anthropiques sont soumis aux mêmes principes écologiques et aux mêmes lois thermodynamiques (Georgescu-Roegen, 1971) que l'ensemble de la biosphère (Vernadsky, 1929). Pour autant, nous souhaitons tester la pertinence et l'apport, pour un état stationnaire (Daly, 1977) au niveau du territoire, de l'économie circulaire.

La seconde hypothèse invoque la possibilité de l'émergence, autrement dit de surgissement des frontières d'appropriation à travers le processus d'organisation des systèmes complexes et la relation d'appropriation de ces biens communs (Hardin, 1968) et de la force de travail. L'économie a fourni des articles importants concernant le problème de la gouvernance sur les frontières et comprend des contributions d'auteurs tels que Jason Moore, John Bellamy Foster et Paul Burkett.

Nous formulons dans notre troisième hypothèse que l'économie circulaire participerait d'une véritable construction économique territoriale : à partir de la condition fondamentalement territoriale de l'acteur dans son tissu économique, elle mettrait en mouvement une approche jointe de la production (Sraffa, 1960 ; Passinetti, 1975 ; Woods, 1984 ; Steedman 1982, 1985; Baumgartner, 2000) plus représentative du système de valeur territoriale.

En inscrivant ce travail de recherche dans le contexte spécifique des espaces territoriaux et leurs frontières, nous développons donc une approche méthodologique, en interaction permanente avec cet objet d'étude qu'est le territoire. Cet ensemble méthodologique nous permettra d'ores et déjà d'apporter quelques éléments de réflexion au sujet (Parties III et IV). Il aura pour effet de rendre manifeste ce processus de construction économique territoriale, au sein d'un cas d'étude (Partie V). Dans ce contexte, notre questionnement méthodologique comprenant les trois dimensions d'analyse poursuit ainsi un double objectif :

- *Un objectif descriptif* : comment définir le territoire et également rendre manifestes les différentes modalités possibles des interactions propriétaire de processus/milieu dans un contexte de circularité. Il s'agit d'accompagner l'expression d'une dynamique d'usage et d'appropriation de la valeur des biens.

- *Un objectif normatif et prescriptif* : comment faire un territoire plus précisément, au travers d'une structuration du système qui permet de profiter des opportunités d'économie circulaire et également rendre de manifeste les systèmes de la valeur associée à l'interface territoriale.

Articulation de la thèse

Pour répondre à ces objectifs, il est donc nécessaire de proposer une méthode qui permette de révéler, en l'accompagnant, ce processus de construction territoriale. Cette thèse structure un ensemble méthodologique dans l'optique d'appréhender le territoire et sa construction dans l'interaction entre les systèmes de la valeur associée au projet de transformation du centre Ivry-Paris XIII et l'évaluation de la disponibilité des ressources dans une situation initiale qui considère un processus de mis en décharge, ensuite un modèle qui inclut l'incinération de déchet et finalement une troisième variation qui étudie le compostage de déchets. Il doit ainsi pouvoir mettre en perspective les enjeux institutionnels dans la construction d'une économie circulaire.

Question de recherche :

ÉVALUATION-BIO-PHISIQUE

Quelle circularité dans les grands cycles de la biosphère des relations nature-nature ?

Quels indicateurs utiliser pour mesurer la circularité des relations nature-homme?

ÉVALUATION ÉCONOMIQUE

Quel système de la valeur dans les bouclages de flux entre la nature et l'économie?

ÉVALUATION INSTITUTIONNEL

Quel projet de transformation du centre Ivry-Paris XIII pour demain, alors que la gouvernance sur les frontières entre l'économie et l'environnement évolue ?

Contexte de l'investigation empirique versus théorique

Changement climatique, épuisement des ressources, désertification, écart entre richesse et pauvreté, exode climatique… l'ensemble des signaux est aujourd'hui au rouge. Il apparaît difficile de s'obstiner à s'accrocher au mythe, cher aux économistes classiques, de la surabondance des ressources (Bourg *et al,* 2010). Il apparaît tout aussi difficile de continuer de croire et d'attendre que la *main invisible d'Adam Smith* puisse nous sortir de cette crise écologique. Il apparaît même urgent de changer de modèle économique, de trouver un mécanisme à même de contrôler la croissance des flux de matières et d'énergie. En répondant à cet appel, l'économie circulaire essaie de changer la logique linéaire de production dominant pour une approche de bouclage des échanges de flux de matières et d'énergie au sein d'un système anthropique global. Nous pouvons nous interroger sur la capacité de l'économie circulaire à proposer un véritable changement de paradigme (Braungart et al, 2009). Il convient donc d'en réinterroger les fondements pour accompagner l'émergence de nouveaux enjeux multidisciplinaires basés sur les principes thermodynamiques de Georgescu-Roegen (1971, 1973), comprenant l'enjeu d'état stationnaire de Daly (1977), les travaux sur l'analyse systémique d'H.T. Odum (1996) et dans le cadre économique l'approche évolutionniste économique de Boulding (1966, 1981).

Cette problématique de recherche ouvre un vaste champ d'exploration théorique et d'investigation pratique. Nous formulons ici les questions générales qui ont guidé notre travail de recherche.

En termes théoriques : Le territoire, comme objet d'études, participe-t-il d'un apport conceptuel et méthodologique sur les trois dimensions de notre analyse pour trouver les opportunités d'économie circulaire ? En retour, l'économie circulaire, comme champ scientifique, parvient-elle à appréhender le territoire ?

En termes empiriques : Le territoire, comme réalité de terrain, conditionne-t-il la mise en œuvre de l'économie circulaire ? En retour, l'économie circulaire, comme démarche, parvient-elle à définir et à structurer un espace géographique en territoire ?

PARTIE I.- REPRESENTATION DES GRANDS CYCLES DE LA BIOSPHERE

DE LA BIOSPHERE DE VERNADSKY AUX CYCLES BIOGEOCHIMIQUES.

Une définition de la biosphère.

La biosphère est un système organisé d'écosystèmes, résultant d'un processus d'évolution des êtres vivants[1]. Ce système comprend les êtres vivants sur terre ainsi que l'ensemble abiotique associé à l'accumulation des minéraux. Cet ensemble forme un système de structure complexe[2] (Wilden, 1972; Maturana *et al.* 1974, 1980; Morin, 1991a, 2005; O'Connor, 1994) composé par des organismes vivants[3], discrets, discontinus et auto poïétiques (Maturana *et al,* 1974)[4]. Ces organismes ne sont pas isolés dans la biosphère, ils sont au contraire liés par des cadres très complexes formant des relations écosystémiques. En effet, cette structure dynamique permet à la biosphère de se réparer elle-même, tel un système auto poïétique, c'est à dire en utilisant ses déchets comme ressources.

Vladimir Versnadsky a popularisé la notion de biosphère (Vernadsky, 1930) qui a elle-même été inventée par Eduard Suess (Vernadsky, 1997). La biosphère est composée de compartiments tels que l'atmosphère, l'hydrosphère et la lithosphère qui sont régis par les lois thermodynamiques. Chaque compartiment de la géosphère peut être décomposé en cycles *biogéochimiques* tels que cycles du carbone, d'eau, du phosphore, de l'azote et du souffre. Cette dynamique cyclique et chaotique (O'Connor, 1993) permet un flux de matière et de l'énergie. En ce sens, l'ordre et le désordre des processus varient en fonction des variations entropiques d'énergie (Lokta, 1921; Vernadsky, 1930; Sewertzoff, 1930; Loiret, 2012) comme les fonctions *redox*. Il s'agit de l'oxydation ou de la réduction des êtres vivants c'est-à-dire de l'échange d'électrons qui intervient dans la respiration cellulaire.

Les lois thermodynamiques qui régissent la biosphère

La science des échanges d'énergie ou thermodynamique met en relation deux principes. D'une part la conservation de l'énergie[5](1847). D'autre part, la production du travail comme énergie mécanique de deux sources de chaleur, à des températures différentes (1824). La science des échanges d'énergie se

[1] James Lovelock postule que les êtres vivants ont adapté à l'atmosphère de la terre et agissant comme un système cohérent ont transformé et maintenu la biosphère avec des caractéristiques optimales pour leur existence comme la salinité des mers, la température, etc. Pour illustrer et démontrer cette évolution, Lovelock et Andrew Watson ont créé une simulation connue sous le nom de Daisy world (Watson *et al.* 1983).

[2] La complexité est un concept utilisé dans divers domaines tels que la philosophie et l'épistémologie (voir des œuvres d'Anthony Wilden en 1972 et d'Edgar Morin en 1991 et 2005), ainsi que la physique et la biologie (voir des œuvres d'Henri Atlan en 1972 et Huberto Maturana et Francisco Varela en 1974 et 1980), la psychologie (voir Vittorio Guidano en 1991), les mathématiques et la science appelle l'information et la communication (voir Alain Turing en 1936).

[3] La complexité biologique s'agit à la vie comprise comme un système complexe. Ils existent des niveaux de complexité pour chaque organisme ou structure biologique.

[4] Un système autopoïétique est organisé comme un réseau de processus de production de composants qui régénèrent continuellement par leurs transformations et leurs interactions le réseau qui les a produits. Le concept d'autopoïèse a été definié par Humberto Maturana et Francisco Varela dans l'article Autopoietic Systems (voir Maturana *et al.* 1974, 1980).

[5] Le premier principe de la conservation de l'énergie s'impose à partir des années 1840 à travers des auteurs comme Julius Robert Von Mayer qui formulé le premier principe de la thermodynamique en 1845, James Prescott Joule qui travaille sur la nature de la chaleur et sa découverte de la relation avec le travail mécanique en 1850 et M. Seguin en 1840.

développe à partir de l'étude des notions de mécanique[6] et des caractéristiques de flux de température et de chaleur[7]. Ce transfert mécanique a également été développé dans des conditions optimales qui ont été étudiées par Lazare Carnot[8]. Cette étude a donné les principes fondamentaux de l'équilibre et du mouvement. Sadi Carnot, fils de Lazaro, a ensuite parcouru le chemin de son père en utilisant le principe d'équilibre thermodynamique, il a ainsi souligné la notion de cycle et la nécessité d'avoir deux sources de température pour produire de l'énergie. Plus tard, en 1865, Rudolph Clausius utilise l'ouvrage oublié *Réflexions sur la puissance motrice du feu* de Sadi Carnot pour inventer le concept d'entropie. Puis en 1873 Willard Gibbs publie son premier article sur la définition de l'équilibre d'un système thermodynamique et affirme qu'il s'agit d'une *fonction d'état* dont l'entropie est un exemple. Suite à son article de 1873 Gibbs a parcouru le chemin de Clausius. Clerk Maxwell a contribue ensuite à élargir l'étude de la thermostatistique[9] grâce au calcul des fluctuations d'énergie.

Plus récemment, certains auteurs ont exploré les relations entre la thermodynamique et la variation des systèmes biologiques (Jorgensen, 1997; Straskraba *et al.* 1999). En conséquence, la thermodynamique souligne la dualité entre des processus existants dans une face d'ordre ou dans une face de désordre comme les processus *redox*. Les systèmes biologiques constitutifs de la biosphère permettent en effet la circulation de matière et d'énergie entre des états d'équilibre thermodynamique vers des états non stationnaires. Il existe donc un parcours continu d'énergie comme le montre Patten *et al.* (1997), nomment la *cascade* de l'énergie tropique.

Deux chercheurs russes, Gubanov et Degermendzhy (2008) ont proposé un système assez fermé en utilisant l'évolution de Darwin appliqué à une chaîne tropique (cf. figure 1).

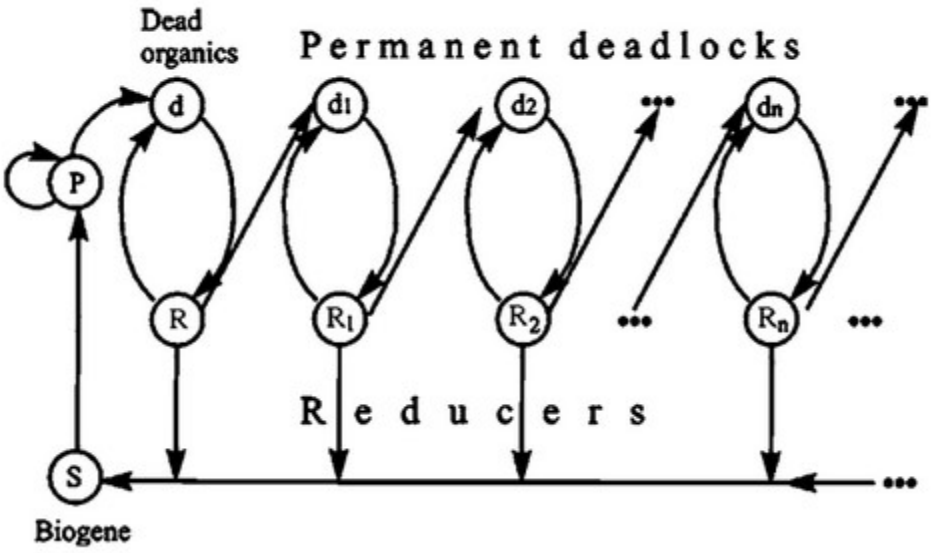
[6] La théorie des sciences de machines a été fondé sur les études de lois de la mécanique de Newton en 1687, la hydrodynamique de D. Bernoulli en 1738, l'architecture hydraulique de Belidor en 1737, le traité de équilibre et du mouvement des fluides de D'Alembert en 1744.

[7] La théorie des transferts de température et chaleur a été explore pour Lavoisier et Laplace dans une mémoire de 1780 qui a donné le début à la calorimétrie.

[8] Les ouvrages de Lazare Carnot comme mathématicien, physicien et général fondateur de l'école Polytechnique de l'arme et homme politique français ont été nombreuses. Il a faite des essais sur les machines en général entre 1783-1786, des réflexions sur la métaphysique du calcul infinitésimal en 1797, la géométrie de position et la corrélation des figures en géométrie en 1803 et 1810 et finalement les principes fondamentaux de l'équilibre et du mouvement en 1803.

[9] Les ouvrages théoriques de la thermostatistique ont été fondés sur les hypothèses de D. Bernoulli de la pression et volume constante dans un système en 1738, l'entropie et la théorie cinétique de Rudolph Clausius, la théorie de la distribution de James Clerk Maxwell qui a permettre de décrire la cinétique de gaz et la théorie de mécanique des fluides de Ludwig Boltzmann.

Figure 1 : L'évolution des boucles de la biosphère



Source : Gubanov *et al.* 2008

Dans la figure ci-dessus, chaque interblocage ou *deadlock* est régi par les lois thermodynamiques. Une partie des déchets de la boucle (R, R_1, R_2, R_n) peut être réutilisé comme intrant par une autre boucle (R vers d_1). Ce type d'adaptation permet une évolution dans le sens darwinien. Ce type de schéma dynamique ou cycle biotique de matière (*Biotic Matter Cycle*) permet de plus, de formuler quelques remarques fondamentales:

- La direction du flux de matière explique un certain sens de l'évolution de chaque interblocage vers le *climax* du système ;

- Le schéma indique le processus de stockage énergétique que Vernadsky opposait au principe de Carnot /Claussius (Loiret, 2016). Autrement dit, dans chaque boucle une partie de l'énergie peut être stockée sous la forme d'ATP (*adénosine triphosphate)* qui peut être transféré à la boucle suivante (transferts de R vers d_1) ;

- Les transferts peuvent être réalisés à travers de la réaction *redox* (oxydoréduction), par exemple, l'azote peut être transformé en oxyde d'azote pour être transféré à une autre boucle ;

- Chaque boucle est un système qui évolue dans un environnement avec lequel il échange de la matière et de l'énergie, et donc un système assez ouvert, loin d'un équilibre thermodynamique. Un système dissipatif est caractérisé par la balance de ses échanges d'énergie et par la création d'entropie ;

- Le système très ouvert inicialmente se referme progressivement vers le *climax*. A ce point du schéma, le système serait auto poïétique en utilisant ses déchets comme ressources (Maturana *et al.* 1974)

Les cycles biogéochimiques comme composant principal de la biosphère.

La biosphère de Vernadsky est définie dans une perspective à la fois biogéochimique et thermodynamique. En effet, la thermodynamique indique que dans une condition d'entropie maximum la chaleur se dissipe dans une sens irréversible en suivant le principe de Carnot, en conséquence, elle ne produit pas de travail mécanique. Par contre, Veradsky constate une croissance des végétaux verts et des bactéries autotrophes, et la production d'entropie négative ou néguentropie. Cette apparente contradiction au principe de Carnot/Cassius pose les fondements de la théorie d'accumulation de l'énergie dans la géosphère (Loiret, 2016). Plus précisément, cette accumulation ou stockage d'énergie serait un indicateur géochimique du travail de la nature (en Joule) comme énergie libre : l'exergie (Wall, 1977; Shao *et al* 2016). En outre, Vesnadsky fait la différence entre énergies géochimiques et biogéochimiques : la première mesure le stockage d'énergie aux compartiments de la géosphère donc atmosphère, lithosphère et hydrosphère, mais elle ne rend pas compte de l'énergie des systèmes vivants comme l'ATP (*Adénosine triphosphate*).

Par ailleurs, G.E. Hutchinson dans une série d'articles publiés en 1944 propose un rapprochement entre les cycles géochimique et biogéochimique donc la géosphère et le vivant. Ces articles s'inspirent de la vision de Lokta et Vernadsky pour mesurer le métabolisme du carbone (Deléage, 1991). En effet, G.E. Hutchinson et les frères Odum furent les premiers à considérer l'écosystème comme une machine thermodynamique capable de maintenir un état d'ordre interne ou basse entropie.

À cet égard, ce tissu vivant est une composante indivisible de la superficie de notre planète selon la vision de Vernadsky. Par ailleurs, en suivant la tradition géochimique, Alfred Lokta propose une modélisation mathématique, et donc une modélisation de la biologie physique. Ces développements sont exposés dans son ouvrage intitulé *Éléments de biologie physique* (1925). De plus, Lotka établit le parallèle selon lequel l'évolution des organismes n'est pas séparée de l'évolution de leur environnement physique; adaptation à notre environnement et inversement. Dans ce sens, Lotka : mathématicien, chimiste physicien et statisticien américain annonce une nouvelle discipline scientifique dans son ouvrage de 1925 : la biologie physique, dont l'objet est la transposition des lois de la physique aux systèmes biologiques. En effet, Lokta est un contemporain de Vernadsky qu'il apprécie; il a développe une approche globale du système monde qui ouvre la voie à l'écologie des systèmes, ce qui est ensuite développé par Hutchinson et Odum.

Dans cette représentation du monde, le minéral comme le vivant ne sont pas que les composants d'un système global de *dégradation* ou de *dissipation* de l'énergie. Non seulement Odum va plus loin, mais il met également en place la relation entre les activités humaines et les processus naturels. Dans son ouvrage *Fundamentals in Ecology* (1953). Actuellement, le sujet à avance vers les systèmes complexes adaptatifs, ce qui indique qu'un système est capable de s'adapter à son environnement à travers de mécanismes comme la plasticité phénotypique (Levin, 1998, 2015).

L'évolution des visions des cycles biogéochimiques : La transition de la biosphère vers la Noosphère.

Pour cerner les problèmes d'insertion des sociétés dans la biosphère, selon Podolinsky, l'homme modifie profondément son environnement. Nous pourrions ainsi renforce la vision de Podolinsky en reprenant les commentaires de Martínez Alier sur la relation entre Podolinsky et Vernadsky :

> *« Des idées d'avant-garde de Podolinsky sont connues surtout pour les commentaires faites par Engels et Vladimir Vernadsky. Engels a lu le travail de Podolinsky en 1882, et bien qu'il apprécie ses efforts, il a parlé contre le mélange entre l'économie et la physique, réduisant ainsi le développement d'un marxisme écologique. En autre, Vernadsky, en 1925, résume bien la contribution de Podolinsky, qui a étudié l'énergie de la vie et a appliqué ces résultats à l'étude des phénomènes économiques.».* (Martínez Alier, 1998).

Et c'est sur ses idées de Marxisme écologique que Podolinsky a mis en avant les idées d'une relation métabolique (Bellamy Foster *et al.* 2004) entre le travail de l'homme et de la nature à travers la théorie de l'accumulation de l'énergie. Finalement, cette relation métabolique a été considérée par Teilhard de Chardin comme la sphère d'action de la pensée humaine ou *noosphère*[10].

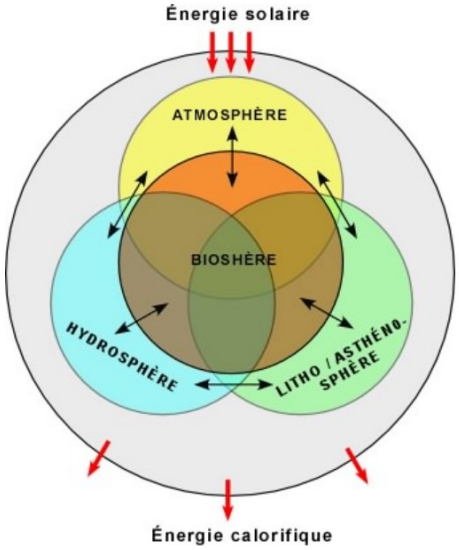
> *« Nous devons renforcer notre approche pour englober l'événement qui se passe sous nos yeux ... la naissance d'une entité biologique particulière qui n'ait jamais existé sur terre. Le développement, en dehors et au-dessus de la biosphère d'une nouvelle couche planétaire, une enveloppe de substance pensante, à laquelle pour la commodité, j'ai donné le nom d'une noosphère »* (Teilhard de Chardin, 1964).

[10] La noosphère littéralement *sphère de l'esprit* ou la couche mentale de la Terre est un concept proposé conjointement par Jules le Roi, philosophe français et élève de Henri Bergson, le paléontologue Pierre Teilhard de Chardin et Vladimir Vernadsky, à Paris en 1926.

1. REPRESENTATION DES GRANDS CYCLES DE LA BIOSPHERE : DE LEUR VALEUR PHYSIQUE A LEUR VALEUR NATURE ECOLOGIQUE[11]

LE CYCLE BIOGEOCHIMIQUE est le processus de transport et de transformation cyclique d'un élément ou composé chimique comme le carbone (C), l'azote (N), le phosphore (P) et le soufre (S), entre les grands réservoirs. En vue de réussir cette représentation, nous pouvons imaginer cette molécule comme un *numéraire*[12] parcourant le cycle de façon invariable.

Figure A : Le système Terre



Source : Université de Laval[13]

Dans ce voyage à travers le système terre (figure A), les parcours des molécules peuvent être considérés comme une collection de nombreux processus biologiques et géologiques (Smith *et al.* 2014) qui, ensemble, forment un système complexe de composantes biogéochimiques.

Nous pouvons maintenant formuler notre approche, pour analyser les pressions exercées par les activités du système socio-économique sur le système terre. Un système complexe composé d'éléments biogéochimiques du capital naturel. Dans cette démarche, nous définissons l'usage et la capacité du système :

[11]Richard Loiret dans ça thèse soutenue en 2015 institule « Le Bilan écologique. Mesurer la perturbation anthropogénique de l'Ecosphère et de la Biosphère (un bilan de l'Anthropocène). Caractériser les voies du Développement écologique des territoires. » analyse la différence entre la valeur physique et la valeur nature écologique.

[12]Au cours de notre recherche, c'est plus approprié la définition de *numéraire* comme un *standard* ou *étalon* de Piero Sraffa (1960), parce que, nos utilisons une mesure invariable de la valeur.

[13] Pour un développement détaille sur les parties du système terre, consulter le site: *http://www2.ggl.ulaval.ca/personnel/bourque/s3/cycles.biogeochimiques.html* (site consulté le 1 juin 2015).

- *Les usages :* Les déchets ou l'empreinte écologique comme la pression imposée par les activités économiques sur le territoire ou *passif écologique*, dans lequel, les acteurs économiques peuvent réaliser une utilisation forcée des ressources.

- *La capacité :* Nous définissons *l'actif écologique* (Loiret, 2016) comme la capacité du système à fournir des ressources, comme les services écosystémiques que nous donne l'agriculture, les pêcheries, les forêts gérées, etc.

Nous avons défini la capacité et les usages, mais dans quelle situation les capacités sont-elles plus grandes que les usages. Pouvons-nous dire qu'il existe une capacité sous-utilisée ? Et donc, que cette capacité peut être *stockée* ou *mobilisée* par les acteurs économiques ? Autrement dit, les ressources stockées restent dans le réservoir comme la lithosphère ou l'atmosphère, donc les autres ressources sont utilisées par d'autres acteurs ou par les usagers de l'économie. Il existe une controverse du point de vue des acteurs de l'économie entre le stockage et l'utilisation des ressources naturelles (Hartwick, 1977). À cause de cette concurrence, nous pouvons représenter la capacité comme un stock physique ou une superficie qui peut être considéré comme une ressource disponible comme la terre, lequel dans le monde réel est utilisé par l'économie comme la capacité productive.

Dans ce sens, nous pouvons identifier une partie des cycles qui représentent l'économie et d'autres qui sont représentables sous la forme d'actifs de l'environnement à travers la capacité et le stock.

Ce système actif/passif peut être caractérisé à travers quatre parties :

A. *Fourniture* : La source que fournissent des matières premières ou services écosystémiques[14].
B. *Extraction* : Les matières premières ou services écosystémiques prélevés par les activités économiques à travers un processus d'extraction.

---

[14] L'émergence de la thématique de fourniture des services écosystémiques (SE) est une sujet qui n'a cessé d'augmenter ces dernières années. En conséquence, c'était important de revenir sur la question des services écosystémiques telle que posée par l'économie écologique (King, 1966; Helliwell, 1969; Hueting, 1970; Odum and Odum, 1972; Pearce, 1993; Turner, 1993; De Groot, 1992, 1994; Bingham *et al.* 1995; Daily 1997; Costanza et al 1997; Pimentel and Wilson, 1997; Limburg *et al.* 1999; Wilson *et al.* 1999; Daily *et al.* 2000; Egoh *et al.*, 2007; Nahlik *et al.* 2012).

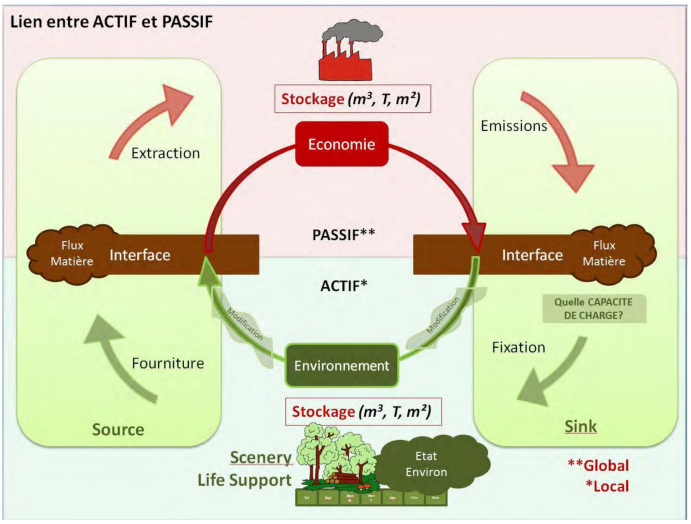
Dans les services que nous rendent les écosystèmes sur Terre. Il y a trois catégories essentielles, la première ce sont les services de fournitures, les fibres, le lin, le chanvre, le coton, le bois de chauffe, le bois de construction, les différentes molécules qu'on utilise comme, les céréales, les légumes, le cheptel. La seconde, ce sont les services de régulation, régulation du climat à l'échelle locale, régulation des populations pathogènes, régénération de la fertilité des sols, épuration de l'eau. La troisième catégorie, c'est plutôt ce qui renvoie à la culture, par exemple pour nous les aménités que nous procure la nature dans le cadre du tourisme ou au quotidien, la préservation de telle espèce animale ou végétale, et puis dessous les très grands services fondamentaux.

Robert Constanza à proposé le premier classement qui regroupe les SE dans 17 grandes catégories. Le classement est utilisé aussi pour Daily (Daily, 1997). Ensuite Rudolf S. de Groot utilisé une typologie de 23 catégories (de Groot *et al.* 2002) avec les restrictions que les ressources minérales non renouvelables comme l'or, le fer, diamants et le pétrole sont exclus de cette liste. Finalement Brendan Fisher (Fisher *et al.* 2009) commencé à utiliser la typologie proposé pour la MEA (MEA, 2005).

C. *Émissions* : L'économie rejette des émissions et déchets comme les GES, le CH_4 ou le CO_2 dans l'atmosphère, l'hydrosphère, la lithosphère et la biosphère.

D. *Fixation* : Ce compartiment doit arriver à stocker ou à neutraliser les émissions et déchets de l'économie par exemple dans la mer.

Figure -B : L'actif et le passif



Auteur : Armand, 2011

Notre représentation par cycle permettra de proposer des interactions entre les activités humaines et l'environnement. De plus, il comporte des échanges entre les compartiments de la figure B. C'est la prise en compte de ces quatre compartiments qui va nous permettre d'analyser les cycles de carbone (C), azote (N), phosphore (P), soufre (S), méthane (CH_4) et de l'eau à travers un numéraire.

Suite à notre représentation des passifs et des actifs, nous voulons définir les unités d'échange entre les compartiments et les cycles, par exemple, les services écosystémiques, lesquels peuvent être, par exemple, de source fiduciaire comme la monnaie ou de source biophysique comme l'énergie. Mais les hommes ne sont pas capables de produire[15] de l'énergie. En revanche, ils sont capables de la capter, de la transformer et de la transporter avec une dissipation thermique intrinsèque[16]. Chacune de ces opérations coûte de l'énergie. Autrement dit, pour capter de l'énergie, on a besoin d'énergie.

À cet égard, l'étude d'un système présentant ce type des contraintes fiduciaires ou thermodynamiques a besoin de plusieurs numéraires sur la base d'un système d'échange, ce qui nous permettra d'étudier la

[15] L'être humain exploite plusieurs phénomènes naturels pour obtenir de l'énergie, comme : les source biochimique donc la matière organique vivante, notamment sucres, almidon et graisses ; la source de bioénergie désigne comme l'énergie stockée par la biomasse (bois, biocarburant) ; la solaire, transportée jusqu'à la Terre sous forme de rayonnement électromagnétique et l'énergie mécanique des corps ou des fluide en mouvement (hydraulique , éolienne , marémotrice , hydrolienne et géothermique).
[16] Pour plus de détails sur la dissipation thermique voir le chapitre VIII.

variation sur les quantités des actifs et des passifs à travers la valeur de l'*étalon*. Pour illustrer cette valeur, il faut utiliser une quantité d'échange par laquelle les autres valeurs sont calculées c'est-à-dire le *numéraire*.

Finalement, le *numéraire* peut être l'équivalence stricte entre plusieurs cycles considérés comme acquis si les processus délivrés par chacun des actifs sont les mêmes (Point, 2012). Puisqu'ainsi, une équivalence peut être établie pour des ensembles de compartiments, qui comprennent dans la figure B, comme source, extraction, émissions et fixation. En ce sens, on va caractériser dans le premier chapitre, les cycles en utilisant le schéma utilisé dans la figure B.

1.1. Le cycle du carbone

Le cycle du carbone est le cycle biogéochimique par lequel le carbone est utilisé comme *numéraire* échangeable entre la biosphère, la lithosphère, l'hydrosphère et l'atmosphère de la terre. De plus, la connaissance de cette circulation de carbone permet d'apprécier l'intervention humaine dans le climat et ses effets sur le changement climatique.

En effet, le carbone (C) est le quatrième élément le plus abondant dans l'univers, après l'hydrogène, l'hélium et l'oxygène (O). C'est la pierre angulaire de la vie que nous connaissons. Il existe essentiellement deux formes de carbone : organiques (présents dans les organismes vivants et les morts, et le décomposé) et minéraux, présents dans les roches. Sur la planète Terre, le carbone circule à travers les océans, l'atmosphère et la surface de la terre et de l'intérieur, dans un grand cycle biogéochimique. Ce cycle peut être divisé en deux: le cycle géologique et le cycle biologique.

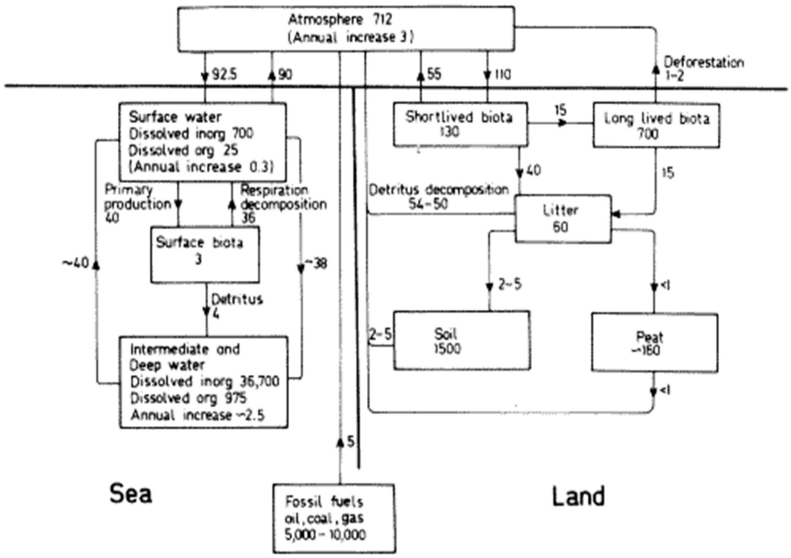
Il est généralement considéré que ce cycle se compose de quatre grands réservoirs de carbone reliés entre eux par des voies d'échange. Les réservoirs sont l'atmosphère, la biosphère terrestre (qui comprend généralement des systèmes d'eau douce et des matières organiques non - vivantes, telles que le carbone du sol), les océans (qui incluent le carbone inorganique dissous, les organismes marins et la matière non vivante) et les sédiments (y compris les combustibles fossiles). D'une part, les mouvements annuels de carbone entre les réservoirs se produisent en raison de divers processus chimiques, physiques, géologiques et biologiques. D'autre part, l'océan contient le plus de carbone actif dans le fond, près de la surface de la Terre, mais il n'est pas échangé avec l'atmosphère.

Comme nous l'avons déjà mentionné, le carbone, compte quatre réservoirs (figure 1.1.1). La majeure partie du carbone terrestre - autour de 20000 milliards de tonnes (Sabine *et al.* 2004; Canadel *et al.* 2007) est piégé dans la lithosphère comme roches sous forme de carbonates et de pétrole[17]. Il est par ailleurs estimé qu'il faudra 470 millions d'années à chaque Mol de carbone pour parcourir le cycle (Smith *et al.* 2014). Ce parcours peut être comptabilisé à travers des flux cycliques qui supportent la vie (O'Connor *et al.* 2009; Schoer *et al.* 2012).

[17] Pour plus de détails sur les carbonates voir l'annexe I.A

Au niveau de la biosphère, le carbone organique existe sous la forme de polymères de plantes (lignine, cellulose, peptidoglycane), de fungis et de bactéries. Le réservoir plus sensible aux perturbations humaines est l'atmosphère, caractérisé par l'oxydation du CH_4 vers CO, du CO vers CO_2 et du COV vers CO_2 (Smith *et al.* 2014). Une partie des émissions de CO_2 est immobilisée dans l'océan comme $CaCO_3$ [18] et dans la terre sous la forme de combustible fossile (Delmas *et al.* 2005). En outre, le retour aux états entropiques durables du (C) va dépendre essenciallement des capacités d'absorption de la végétation et des océans (GIEC, 2007) et du stockage de (C), à savoir le stockage géologique, le stockage océanique et la carbonatation des minéraux ainsi que leurs utilisations industrielles (Metz *et al.* 2005).

Figure 1.1.1 Cycle du carbone[18] : Vision biochimique



Source : scopenvironment.org (site consulté le 15 juin 2015).

Une forêt en pleine croissance peut absorber entre 11 et 37 tonnes de CO_2 par hectare et par an. Alors que la France émet 540 millions de tonnes de CO_2 chaque année, sa forêt permet la séquestration de 12 % de ce volume (Lambert, 2013). Dans ce sens, les émissions de CO_2 ont été diminuées de 399 Tg vers 369 Tg (Nicco, 2014). En conséquence, le scénario peut être amélioré grâce au le recyclage de molécules de (C) comme le papier (40 à 50% de recyclage maximum) ou le plastique (2 à 7% de recyclage maximum) (Gutowski *et al.* 2013) tout en sachant que 68% des ressources nécessaires au fonctionnement de l'économie française sont non renouvelables (IAU, 2013).

[18] Pour développement détaillé sur les différentes parties du cycle du carbone dans l'hydrosphère, consulter le site: *http://www.scopenvironment.org/downloadpubs/scope21/chapter02.html#t2.4* (site consulté le 15 juin 2015).

1.1.1. Le cycle biologique du carbone

Comme indiqué dans la section précédente, le cycle biologique du carbone montre les stocks de carbone dans les réservoirs et les flux pertinents aux perturbations anthropiques, les stocks pouvant être exprimés en termes des moyennes annuelles au cours de la décennie 1989-1998 (basé sur Schimel *et al.* 1996). Le cycle biologique du carbone est relativement rapide : sur cette base, il est estimé que le renouvellement des stocks de carbone atmosphérique se produit tous les vingt ans. De même, dans le cycle biologique, il existe trois dépôts : la terre (2500 Gt), l'atmosphère (760 Gt) et les océans (3900 Gt) (Hairiah *et al.* 2011). Ce cycle joue par ailleurs un rôle important dans les flux de carbone entre les différents réservoirs, à travers des processus de la photosynthèse et de la respiration.

Grâce à la photosynthèse, les plantes absorbent l'énergie solaire et le CO_2 dans l'atmosphère, produisant ainsi de l'oxygène et des hydrates de carbone (les sucres comme le glucose), qui forment la base pour la croissance des plantes (pour plus de détails sur la photosynthèse, la respiration et le stockage dans la lithosphère en annexe I.A). De même, les animaux utilisent les hydrates de carbone dans le processus de respiration, en utilisant l'énergie contenue dans les hydrates de carbone. Par ailleurs les plantes participent aux émissions de CO_2 à travers la décomposition organique (la respiration comme les bactéries et les champignons) et les rendements de la respiration du carbone dans les réservoirs terrestres fixés biologiquement telles que le biote, les tissus, le pergélisol des sols et la tourbe de l'atmosphère.

Les équations chimiques qui régissent ces deux processus sont :

Photosynthèse: $6CO_2 + 6H_2$ + énergie (lumière du soleil) -> $C_6H_{12}O_6 + 6O_2$

Respiration: $C_6H_{12}O_6$ (matière organique) + $6O_2$ -> $6CO_2 + 6H_2$ + énergie

En outre, le plus grand changement dans le cycle du carbone est celui qui se produit entre le dépôt terrestre et atmosphérique issu des processus de la photosynthèse et de la respiration. Au printemps et en été, les plantes absorbent la lumière du soleil et le CO_2 de l'atmosphère et, en parallèle, les animaux, les plantes et les microbes, par la respiration, renvoient le CO_2. Lorsque la température ou l'humidité est beaucoup plus faible, par exemple en hiver dans les déserts la photosynthèse et la respiration sont réduites ou cessent et le flux de carbone entre la surface terrestre et l'atmosphère s'arrête également.

En raison de la répartition inégale de la végétation dans les hémisphères, un flotteur est visible tout au long de l'année dans les graphiques des variations annuelles de la concentration de CO_2, comme la courbe de Keeling (Beck, 2008). En 1958, le scientifique Charles David Keeling (océanographe à l'Institut Scripps d'océanographie) a lancé une série d'expériences à Mauna Loa, à Hawaï, afin de déterminer, avec une précision raisonnable, la concentration de CO_2 dans l'atmosphère.

Autrement dit, bien que le réservoir de carbone dans l'atmosphère soit le plus petit des trois (avec environ 750 Gt C), ce dépôt détermine la concentration de CO_2 dans l'atmosphère. Cette concentration peut influer sur le climat terrestre. En outre, les flux annuels entre le stock atmosphérique, les réserves océaniques et la croûte terrestre sont très sensibles aux changements.

Parmi les trois réservoirs, les océans représentent le principal réservoir. Des transferts entre l'atmosphère et l'océan existent à travers des procédés chimiques qui établissent un équilibre entre les couches de

surface des océans et les concentrations de l'air en surface. La quantité de CO_2 que l'océan absorbe dépend de sa température et de la concentration déjà présente. Les basses températures de la surface de l'océan augmentent l'absorption de CO_2 dans l'atmosphère, alors que des températures plus élevées peuvent provoquer l'émission de CO_2. En effet, l'océan absorbe environ 26%[19] du CO_2 dégagé chaque année dans l'atmosphère. C'est cette réaction chimique qui provoque *l'acidification de l'océan*, l'acidité de l'océan a ainsi augmenté de 30%[19] depuis le début de la révolution industrielle.

La vie océanique consomme de grandes quantités de CO_2, mais le cycle entre la photosynthèse et la respiration s'effectue beaucoup plus rapidement. Le phytoplancton est mangé par le zooplancton en quelques jours, et seules de petites quantités de carbone sont accumulées dans le fond de la mer, quand les *obus* de zooplancton, composés de carbonate de calcium, sont déposés dans le fonds après leur mort. Après une longue période, ceci représente une élimination de l'effet significatif du carbone de l'atmosphère.

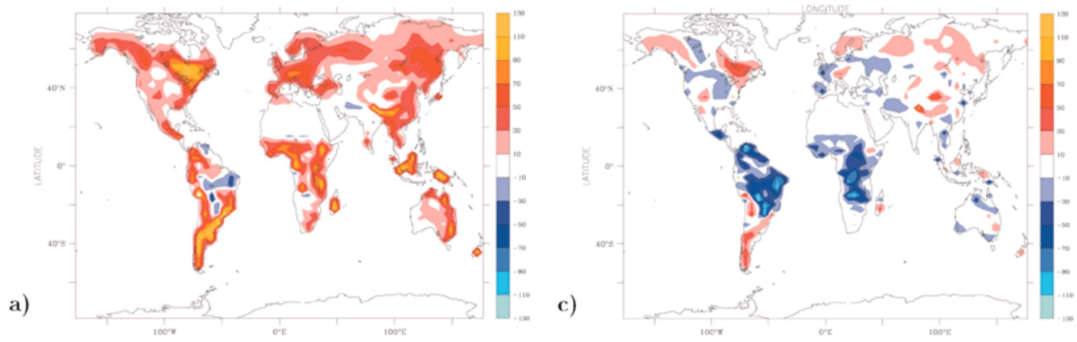
Un autre processus se produit à travers l'élimination du carbone dans son cycle de vie dans l'atmosphère (un point que nous traiterons en utilisant le modèle de l'IPSL ci-après de manière plus détaillée). Ce type de processus a lieu quand la respiration dépasse la photosynthèse et que les dépôts de sédiments de matières organiques qui se forment lentement pendant des millions d'années en l'absence d'oxygène deviennent des combustibles fossiles. En outre, les incendies (*naturels*) constituent non seulement un cycle rapide qui ajoute du CO_2 dans l'atmosphère en consommant de la biomasse et de matière organique mais provoquent aussi la mort des plantes que se décomposent et forment du CO_2.

[19] L'acidification de l'océan. Qu'est-ce que l'acidification de l'océan? qui a été consulté en: *http://www.unesco.org* (site consulté le 15 juin 2015).

Modèle couplé Climat-Carbone de l'institut Pierre Simon Laplace (IPSL)

Le modèle climat-carbone est construit à partir des données des émissions de combustibles fossiles anthropiques et estimées par le scénario IPCC SRES-A2 pour 2000-2100 (Friedlingstein *et al*, 2007). Il traite l'influence du changement climatique (dû aux rejets anthropiques du CO_2) sur les puits de carbone liés à la biosphère continentale ($gC/m^2/yr$) : (a) cette figure montre la différence du puits biosphérique entre les années 2050 et les années 1860 calculées avec le modèle couplé Climat-Carbone ; (c) cette figure décrit l'effet du changement climatique dû aux rejets anthropiques du CO2 sur le puits de carbone biosphérique en 2050.

Les figures **a** et **c** montrent que dans les basses latitudes, la croissance des plantes est principalement limitée par la disponibilité en eau. Par contre, aux hautes latitudes, la croissance des plantes est principalement limitée par la température : le réchauffement climatique leur permettra, au contraire, un meilleur développement, augmentant ainsi le puits de carbone.



1.1.1.1. Le méthane : composant du cycle biologique du carbone.

Le méthane (CH_4) est un gaz de la famille des hydrocarbures. Il se produit de la manière suivante : pour leur production les matières organiques sont enterrées sous des couches de sédiments. Avec le temps et sous l'effet de la pression et de la chaleur, ces couches sédimentaires se transforment en hydrocarbures (Rakib, 2012).

Le méthane est issu en grande partie des activités agricoles : rizières, élevage des ruminants, déjections animales avec une durée de vie dans l'atmosphère de 12 ans. Le méthane correspond à 14% des émissions mondiales de GES d'origine humaine en 2004 (GIEC, 2007) avec un potentiel à effet de serre 21 fois supérieur à celui du CO_2 (Backhaus, 2012). L'agriculture est ainsi responsable de 50% des émissions de méthane (environ 3 GteqCO_2 par an) (Vandeale, 2010). De même, l'élevage représente une source importante de gaz à effet de serre en France, sous forme de méthane avec 80 installations qui traitent 149 400 (tms/an) et qui produisent 7,105 (GWh/an) (Marchais, 2011). Les 4 régions les plus concernées restent la Bretagne, les Pays de la Loire, la Basse-Normandie et la Lorraine (Thual, 2013). Des recherches menées par l'INRA montrent qu'un apport de 6% de lipides issus de graines de lin diminue la production de CH_4 des vaches laitières de 27 à 37% (Ferlay, 2009).

1.1.2. Le cycle du carbone géologique

Le cycle du carbone géologique, qui opère sur une échelle de millions d'années, est intégré dans la structure même du monde et a été lancé il y a environ 4,55 milliards d'années, quand il a formé le système solaire et la terre. À son origine étaient les planétésimaux[20](petits corps qui s'étaient formés à partir de la nébuleuse solaire) et des météorites contenant du carbone qui sont entrées en collision avec la terre. Plus de 99% du carbone terrestre est contenu dans la lithosphère, avec plus de carbone inorganique stocké dans les roches sédimentaires telles que le calcaire. Le carbone organique dans la lithosphère est stockée dans les dépôts de carburants fossiles.

Sur une échelle géologique, il existe un cycle entre la croûte (lithosphère), les océans (hydrosphère) et l'atmosphère : la formation de carbonates. Il se produit quand le dioxyde de carbone (CO_2) dans l'atmosphère se combine avec de l'eau pour former l'acide carbonique qui ensuite réagit lentement avec du calcium et du magnésium dans la croûte terrestre. A travers les processus d'érosion (pluie, vent), les carbonates sont lavés dans les océans, où ils s'accumulent en couches dans le lit de l'océan, ils sont ensuite absorbés par les organismes marins qui après leur mort seront aussi déposés au fond de la mer[21] ; ces sédiments sont accumulés pendant des milliers d'années et forment le calcaire.

Le cycle se poursuit lorsque les roches sédimentaires des fonds marins sont entraînées dans le manteau de la terre par le processus de subduction (le processus par lequel une plaque tectonique descend sous une autre). Lorsque les roches sédimentaires de point de fusion élevé sont soumises à des pressions ou/et à

[20] Les petits corps constitués par agglutination de poussières, au cours du processus de formation des planètes, consulté dans le dictionnaire en ligne: *http://dictionary.reverso.net/french-definition/plan%C3%A9t%C3%A9simaux* (site consulté le 17 juin 2015).
[21] Pour plus de détails sur le cycle voir l'annexe I.A.

des températures inférieures à la surface de la Terre, elles réagissent avec d'autres minéraux en libérant du CO_2. Le CO_2 est rejeté dans l'atmosphère par les éruptions volcaniques et d'autres activités volcaniques, complétant ainsi le cycle.

L'équilibre entre les différents processus du cycle du carbone géologiques a contrôlé la concentration de CO_2 dans l'atmosphère pendant des millions d'années. D'une part, les plus anciens sédiments géologiques, qui existaient avant le développement de la vie sur Terre, suggèrent des concentrations atmosphériques de CO_2 une centaine de fois plus élevée qu'aujourd'hui, offrant un fort effet de serre. D'autre part, les mesures de carottes de glace retirées de l'Antarctique et du Groenland montrent que durant la dernière période glaciaire les concentrations de CO_2 (180 ppmv CO_2) étaint moitié moins importantes qu'anjourd'hui (en 2005 de 379,1 ppmv CO_2) (Balibar, 2009).

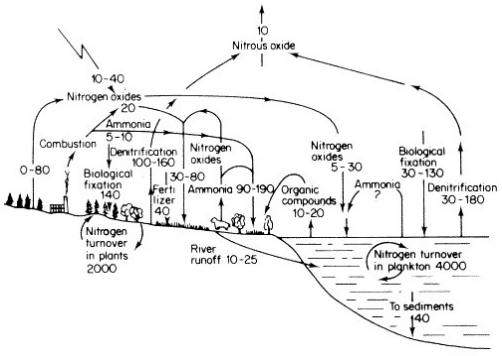
Au final, après un processus de décomposition, une partie de matière organique, devient à long terme du charbon, du pétrole et du gaz naturel. Ainsi, toute modification significative des différents dépôts affecte l'échelle géologique. Il y a environ 200 ans, avec le début de la révolution industrielle et l'exploitation et l'utilisation (combustion) des combustibles fossiles à grande échelle, le carbone a commencé à se libérer dans l'atmosphère.

1.2. Cycle de l'azote

L'azote est l'élément le plus important des organismes vivants après O, H et C, dans sa forme réduite (NH_4^+ et NH) et dans sa forme oxyde (NO_x, HNO_3, N_2O, NO_3-).

Plusieurs chaînes alimentaires sont possibles grâce aux transformations réversibles d'oxydoréduction, car la balance de N varie de -3 (pour NH_3) jusqu'à +5 (pour NO_3) (Demas *et al.* 2005).

Figure 1.2.1 Cycle de l'azote : Vision biochimique



Source : scopenvironment.org [22] (site consulté le 18 juin 2015).

[22] Pour développement détaillé sur les différentes parties du cycle de l'azote dans l'hydrosphère. Les flux sont en teragrames (10^{15}) de N par année, ils ont été consultés sur le site: *http://www.scopenvironment.org/downloadpubs/scope21/chapter02.html#t2.4* (site consulté le 18 juin 2015).

L'azote se trouvant dans la terre est concentré sur une quantité de $1.6x10^{16}$tonnes métriques (Psychosios, 2012) sur la croûte terrestre. Il existent aussi deux autres réservoirs : la matière organique et le biote. D'une part, par le N_2 se trouve environ $3.95x10^6$ billions de tonnes métriques dans l'atmosphère (Delmas *et al.* 2005). D'autre part, l'azote se concentre dans l'océan comme NO_3^- en une quantité de 570 billions de tonnes (Psychosios, 2012), NH_4^+ qui peut être fixe à partir de N_2 à travers des diatomées dans la mer (Carpenter *et al.* 1999) (cf. le cycle dans la figure 1.2.1).

Tableau 1.2.2 : Les estimations du budget global de NOx (en TgN / an) de la troposphère

Reference:	TAR	Ehhalt (1999)	Holland *et al.* (1999)	Penner *et al.* (1999)	Lee *et al.* (1997)
Base year	2000	~1985	~1985	1992	
Fossil fuel	33.0	21.0	20 - 24	21.0	22.0
Aircraft	0.7	0.45	0.23 -0.6	0.5	0.85
Biomass burning	7.1	7.5	3 - 13	5 - 12	7.9
Soils	5.6	5.5	4 - 21	4 - 6	7.0
NH_3 oxidation	-	3.0	0.5 - 3	-	0.9
Lightning	5.0	7.0	3 - 13	3 - 5	5.0
Stratosphere	<0.5	0.15	0.1 - 0.6	-	0.6
Total	**51.9**	**44.6**			**44.3**

Source : IPCC, 2001

En France, la pollution par les oxydes d'azote n'a pas significativement diminué depuis vingt ans. Cette tendance est due à l'augmentation du trafic automobile qui est la principale source de pollution par les oxydes d'azote (cf. le tableau 1.2.2). L'agriculture est quant à elle responsable de plus de 70% des émissions mondiales de protoxyde d'azote (environ 3,2 Gteq CO_2 par an) (Vandaele, 2010). Voir sur la page suivante les modèles de simulation sur le cycle de l'azote.

Concernant l'ammoniac, la principale source d'ammoniac dans l'air est l'élevage et l'utilisation d'engrais en agriculture (CORPEN, 2001) (on peut trouver plus de détails sur l'ammoniac en annexe I.B). En citant quelques passages du document de Cellier *et al.* (2012), on peut obtenir de détails à cet enjeu :

> *« Très abondant sous forme de diazote (N_2), il n'est utilisable que par certains microorganismes, dont les Rhizobiums impliqués dans la fixation symbiotique d'azote par des légumineuses » ; « la fixation symbiotique et le recyclage de l'azote grâce aux déjections animales fournissaient l'amendement organique nécessaire au maintien de la fertilité des sols » « L'élevage a une contribution importante dans les fuites d'origine agricole, principalement pour trois composés : l'ammoniac qui contribue à l'acidification, à l'eutrophisation des milieux, et à la formation de particules atmosphériques ; le nitrate qui dégrade la qualité des eaux ; et le protoxyde d'azote qui est un puissant gaz à effet de serre et participe à la destruction de l'ozone stratosphérique »* (Cellier *et al.* 2012).

Modèles de simulation et études sur le cycle de l'azote chez INRA

Il existe plusieurs études sur la pression des émissions de gaz d'acidification sur l'environnement (Schoer, 2001) et sur les modèles de simulation du cycle de l'azote dans des bassins versants (Chambaut *et al.* 2008 ; Payraudeau, 2012).

Nous avons trouvé des thèses sur les modèles du cycle de l'azote. La première chez INRA exprime le mouvement de l'ammoniac dans le cycle de l'azote, qui montre en détail comment il va rapidement réagir chimiquement avec la vapeur d'eau, en même temps qu'il est transporté par les vents, à différentes distances suivant sa forme chimique. Et enfin, il va se déposer sur le sol où il participe au cycle de l'azote du sol (Loubet, 2000). La seconde montre les émissions d'ammoniac par les activités agricoles et l'impact sur la qualité de l'air en utilisant les prévisions du modèle de chimie transport CHIMERE (plateforme PREV'AIR) qui affiche une sous-estimation de la concentration en particules durant ces épisodes ainsi que de leur teneur en nitrate d'ammonium (Hamaoui-Lague, 2012).

À partir de ces études, on trouve plusieurs manières de combattre l'acidification, réduisant ainsi la pollution atmosphérique, en adaptant la gestion des forêts aux capacités réelles du sol (Bonneau *et al.* 1992). On évite ainsi d'appauvrir et d'acidifier ce dernier. En apportant du calcaire broyé au sol, on neutralise ainsi partialement l'acidité du sol (Dambrine *et al.* 2001).

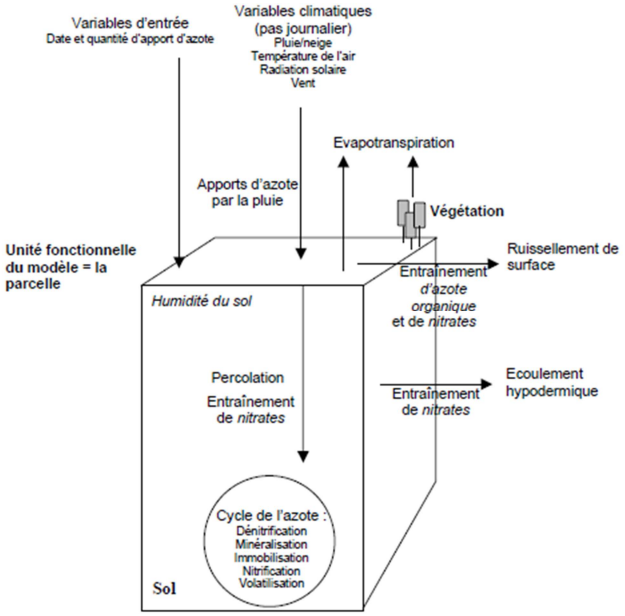
Ce type de modèles de simulation des bassins versants, (plus de détails à la page suivante) nous permet de quantifier les émissions de gaz d'acidification et le parcours sur le cycle de l'azote sur des bassins car il nécessite des calages qui restent à effectuer pour diminuer au niveau agricole de plus de 70% des émissions mondiales de protoxyde d'azote (N_2O) important GES comme nous l'avons montré dans le schéma sur le *Cycle de l'azote: Actif - Passif* au début de la section.

Finalement, la description physique sur le cycle de l'azote a pour objectif d'éclaircir la structure et les échanges entre les composants sur le cycle qui ont contribué à rendre possible une analyse des opportunités d'économie circulaire dans le flux physique de l'azote. Autrement dit, la structure du cycle détermine sa nature, ses caractéristiques, ses limites et ses dimensions.

Modèles de simulation de flux d'azote sur des bassins versants : EPIC

Le modèle EPIC (*Erosion Productivity Impact Calculator*) avait pour objectif d'étudier l'impact de l'érosion sur la productivité des sols. Les versions récentes permettent d'étudier les pertes de nutriments (azote et phosphore) à l'échelle de la parcelle.

Le modèle décrit les processus chimiques (dénitrification, minéralisation, immobilisation, nitrification, volatilisation) et les processus de transport comme : percolation verticale, écoulements de la surface et de la subsurface, remontée des nitrates vers la surface lors du phénomène d'évaporation des sols, transport de l'azote organique sur le sédiment.



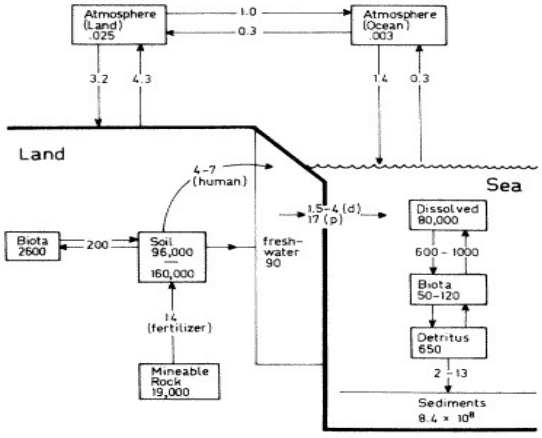
Source : PAYRAUDEAU, 2002

Il existe d'autres modèles présents dans la thèse de Sylvain Payraudeau. Les modèles permettent d'analyser l'azote sur des petits bassins versants comment : *AGNPS, ASNWERS, ARM, BASINS, BASSIN VERSANT, BICHE, CRS, CREAMS, DAISY, GIBSI, HBV-N; HSBF, MORELN, SENEQUE* etc.

1.3. Cycle du phosphore

Le phosphore (P) à la différence de (C) et de (N) a reçu peu d'attention en tant que matière première et engrais de base de l'agriculture moderne. Par exemple, une augmentation de la production de biocarburants va augmenter la demande de (P). La molécule de (P) parcourt fondamentalement la lithosphère et l'hydrosphère à travers des flux qui ne sont pas complètement circulaires. En revanche, ces flux en cascade sont extraits des stocks dans la terre, mais ils ne se retrouvent pas dans la terre dans leurs totalité. Alors que tous les agriculteurs ont besoin de (P), un très petit nombre de territoires comme le Maroc, le Sahara occidental et la Chine prennent le contrôle des réserves (European Commission, 2014). Etant donné que le phosphore constitue une ressource non renouvelables et que sa régénération prend 1.61 billion de Pg années (Smith *et al.* 2014). De plus, après l'extraction et la consommation de (P) voir figure 1.3.1, des pertes considérables ont été constatées entre les fumiers. Les eaux d'égout issues des détergents de lave-vaisselle d'origine purement domestique ont été estimées à 1.8 g P/(j.hab) depuis 2007 (Stricker *et al.* 2010 a,b). De même, la nourriture et les résidus de récolte qui polluent les cours d'eau, mettent la pression sur les milieux fragiles.

Figure 1.3.1 Cycle du phosphore



Source : scopenvironment.org[23] (site consulté le 23 juin 2015).

Concernant la reconnaissance de la relation entre l'augmentation de l'apport de (P) par les détergents (Glennie *et al.* 2002) dans les eaux de surface et l'augmentation subséquente de l'eutrophisation de la surface de l'eau (Harper, 1992; McComb, 1995; Tunney *et al.* 1997), l'eutrophisation peut être stoppée à travers la déphosphoration des eaux usées par filtres plantés garnis de phosphorites (voir le processus à la page suivante) (Molle, 2012). Les données permettant d'évaluer l'élimination du phosphore sont rares. En revanche, nous pouvons obtenir ces donnés à travers des méthodes comme l'immobilisation du phosphore sur un procédé de granulation aérobie (Manas *et al.* 2011) ou encore le recyclage du phosphore des lisiers de porcs sous la forme d'engrais chimique, facilement exportable et valorisable en dehors des zones de production animale intensive (Daumer, 2007).

[23] Pour développement détaillé sur les différentes parties du cycle du phosphore dans la géosphère. Les flux sont en teragrames (10^{15}) de P par année ont été consultés sur le site: *http://www.scopenvironment.org/downloadpubs/scope21/chapter02.html#t2.4* (site consulté le 16 juin 2015).

L'eutrophisation dans le cycle de phosphore : Projet PHOSPH'OR

La valorisation des effluents par le recyclage des nutriments, dont le phosphore (P), est devenue une priorité. Dans ce sens, on peut trouver des effluents urbains très dilués (10 mgP/L). En revanche, dans l'agriculture les effluents sont très concentrés (ex: fromagerie 100-300 mgP/L), lesquels génèrent l'eutrophisation (Sperandio, 2011).

En effet, il s'agit de préserver la ressource et de lutter contre l'eutrophisation en adaptant les apports des opérations techniques de traitement de l'eau. Ce type d'opérations permet d'éviter l'eutrophisation en partant de plusieurs caractéristiques d'une eau eutrophe comme sa teneur de phosphore et azote, la présence de matières organiques dissoutes, la présence d'algues planctoniques, la teneur de pH et la température (Bouni *et al.* 1989). Les effets visibles sont le développement planctonique; la prolifération des algues et des macrophytes (Mama, 2010). Le programme coopératif international de surveillance des eaux douces de l'OCDE (1982) a fixé des valeurs limites pour les concentrations en phosphore et en chlorophylle *a*. C'est la classification de l'état trophique.

PL = taux moyen de phosphore total ; Chl moyen = taux moyen de chlorophylle a; Chlmax = taux maximum de chlorophylle a.

Tableau 1.3.2: Classification de l'état trophique selon l'étude de l'OCDE (1982)

Classes des états trophiques	indices de l'état trophique (mg/m^3)		
	P_L	Chl_{moyen}	Chl_{max}
Ultra-oligotrophe	< 4.0	<1.0	<2.5
Oligotrophe	<10.0	<2.5	<8.0
Mesotrophe	10-30	2.5-8.0	8.0 – 25
Eutrophique	35-100	8-25	25 -75
Hypereutrophe	>100	>25	>75

Source : Mama, 2010

Afin de surveiller le teneur en P des eaux douces pour éviter l'eutrophisation (P_L= 35-100 mg/m^3), le programme Phosph-OR regroupe une centaine de participants, notamment des scientifiques de l'IRSTEA, LISBP, LBE-INRA, lesquels proposent les choses suivantes (Sperandio,2011):

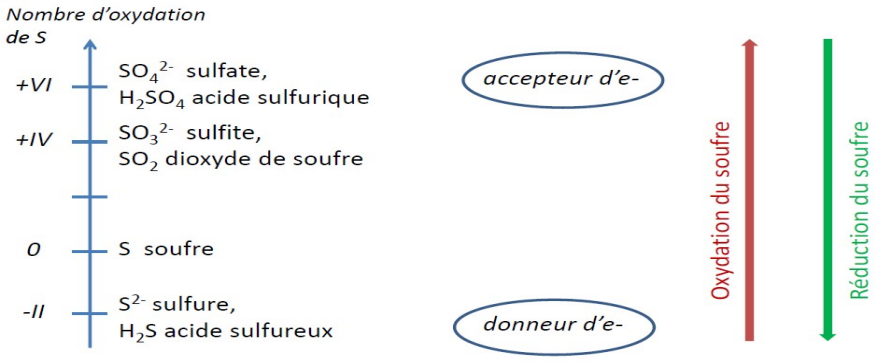
- L'IRSTEA étudie une filière de récupération de struvite (NH_4MgPO_4) avec des lisiers par séparation de phase, acidification et cristallisation.
- Des projets de concentration des phosphates après méthanisation (filtration, cristallisation).
- Mieux traiter le phosphore des effluents en produisant des produits transportables et recyclables pour éviter l'utilisation des métaux et favorise la cristallisation avec Ca ou Mg.

1.4. Cycle du soufre

L'interconversion réversible des sulfates et des sulfures dans le milieu naturel est appelée *cycle du soufre* avec une régénération chaque 160 millions de Pg années (Smith *et al.* 2014).

Le soufre présent dans les roches (pyrite:FeS_2) par érosion et altération, devient du sulfate dissout au contact de l'oxygène (SO_4^{-2} avec un nombre d'oxydations de +6). Le soufre peut être réduit à acide sulfureux (nombre d'oxydation -2) ou sulfure d'hydrogène qui est utilisé dans la fabrication de sulfures métalliques (voir l'oxydation-réduction du souffre sur la figure 1.4.1). Les sulfures métalliques comme le sulfure de sodium et le hydrosulfure de sodium sont utilisés par l'industrie du papier, dans la fabrication de mercaptans, dans l'industrie des colorants, du caoutchouc, du cuir, des pesticides et de certains polymères et additifs des plastiques (Bisson, 2011).

Figure 1.4.1 Nombre d'oxydation du soufre



Source : L'auteur

Certaines industries rejettent directement dans les milieux naturels des sulfates et du sulfure d'hydrogène (H_2S) comme dans la baie de Morieux. Le H_2S est un irritant des voies respiratoires et un neurotoxique par asphyxie (INERIS, 2011). Les sulfates dissous deviennent du carbonyle de sulfure (COS). Le COS s'échappe par la surface des océans vers l'atmosphère comme cela été modélisé par Castebrunet en 2007.

En outre, le COS est inerte dans la troposphère, mais s'oxyde en SO_2 et en SO_4 dans la stratosphère. Le SO_2 vient de l'utilisation des combustibles à des fins énergétiques, des procédés industriels (raffinage du pétrole, production d'acide sulfurique, traitement du gaz naturel) et des volcans. En France métropolitaine plus de la moitié des émissions de SO_2 dans l'air proviennent des secteurs de transformation de l'énergie et de l'industrie manufacturière (cf. annexe I.C).

Un autre composant sur le cycle du souffre, le diméthylsulfure (DMS), est un produit naturel issu de la décomposition des cellules du phytoplancton dans la couche supérieure de l'océan. Les diatomées sont des

producteurs primaires océaniques majeurs de DMS et exportent d'importantes quantités de silice biogénique vers les sédiments marins qui ont été étudiés pour le projet ICOP[24].

Le dioxyde de soufre provient de l'oxydation du COS, de l'oxydation du DMS et de nombreux rejets industriels dans l'atmosphère. Il s'oxyde en SO_4 dans la stratosphère et participe aux pluies acides dans la troposphère. Le volcanisme peut également modifier le climat pendant plusieurs années en injectant des quantités importantes de dioxyde de soufre dans la stratosphère, lequel est ensuite oxydé en acide sulfurique (Baroni, 2006). De même, l'acide sulfurique des pluies acides redevient des sulfites en milieu aqueux. Au niveau industriel, le H_2SO_4 peut être utilisé pour l'exploitation minière et pour l'industrie du papier, le soufre est produit par désulfuration des ressources pétrolières (Schoer *et al.* 2012).

Somme tout, pour diminuer les pluies acides, il existe des technologies qui s'appliquent dans la cheminée comme la désulfuration par lavage des fumées (Joos, 2005). D'autres technologies comme la Bauxaline® et ses dérivés ont la capacité de neutraliser ces eaux acides et de piéger les polluants métalliques contenus dans d'anciens résidus miniers (Alteo-alumina, 2014) (cf. annexe I.C).

1.5.1. Le soufre dans l'agriculture

Comme nous l'avons mentionné précédemment, le soufre existe dans le sol sous forme minérale comme sulfate qui est apporté par les fertilisants minéraux, les déjections des animaux, les retombées atmosphériques et les résidus des IAA et boues d'épuration. Il peut être utilisé comme fongicide anti oïdium appliqué aux vignes et comme apport par les eaux d'irrigation.

Le cycle biologique du soufre dans la nature est similaire à celui de l'azote dans le sol. Tous deux sont stockés à l'état organique ou sous forme minérale, ils sont ensuite libérés sous une forme assimilable par la plante a travers un processus analogue (on peut trouver plus de détails graphiques du cycle en annexe I.C).

Expliquons désormais le cycle agricole du soufre à travers les étapes suivantes[25] :

1. Stockage et recyclage du soufre contenu dans les effluents d'élevage, résidus de culture et autres sous-produits organiques issus des activités humaines ;

[24] Le projet ICOP analyse les Impact des interactions Fe-Cu sur le phytoplancton océanique. Le phytoplancton océanique joue un rôle clé dans les concentrations atmosphériques de gaz d'importance climatique comme le dioxyde de carbone (CO2) et le diméthylsulfure (DMS). Sa croissance est cependant limitée dans 40 % de l'océan par un micronutriment essentiel, le fer (Fe). Un autre métal, le cuivre (Cu), pourrait également influencer la production primaire océanique. Le projet vas a étudier l'impact du fer et du cuivre sur les rapports élémentaires, le cycle du DMS, les processus de silicification et de dégradation de la silice biogène, et les stratégies d'acquisition du fer et du cuivre de deux espèces phytoplanctoniques océaniques. Egalement, le projet vas a évaluer l'importance des interactions fer/cuivre sur la biogéochimie océanique à l'échelle globale.
Le projet ICOP a été consulté sur le site: http://www.agence-nationale-recherche.fr/suivi-bilan/editions-2013-et-anterieures/recherches-exploratoires-et-emergentes/jcjc-generalite-et-contacts/jcjc-presentation-synthetique-du-projet/?tx_lwmsuivibilan_pi2%5BCODE%5D=ANR-10-JCJC-0606 (site consulté le 22 juin 2015).

[25] Le cycle agricole du soufre a été consulté sur le site: *http://fertilisation-edu.fr/cycles-bio-geo-chimiques/le-cycle-du-soufre-s.html* (site consulté le 22 juin 2015).

2. Fabrication des engrais sous forme d'engrais azotés (sulfate ou thiosulfate d'ammoniaque, sulfate de calcium ou sulfate de magnésium), d'engrais simples (phosphatés, potassiques et magnésiens) et d'engrais composés PK ou NPK ;
3. Apport du sulfate ou du soufre qui s'oxyde en sulfate dans le sol les produits phytosanitaires comme le sulfate de cuivre utilisé en viticulture ;
4. Transfoemation des micropolluants atmosphériques de soufre en oxyde (SO_2 ou SO_3) et en sulfate au contact avec le sol ;
5. Transforment du sulfate minéral en soufre organique par les microbes ;
6. Possibilité de réduction du souffre en sulfure et en hydrogène sulfuré H_2S en conditions anaérobies et en sulfate en conditions aérobies dans le sol ;
7. Lixiviation du sulfate gracê à l'eau du sol ;
8. Absorption racinaire des végétaux sous la forme de sulfate ;
9. Absorption foliaire sous forme de vapeur de soufre élémentaire (S) ;
10. Récolte transformée en nourriture (humaine ou animale).

Finalement, le soufre, tout comme l'azote est un élément qui a des effets positifs sur le rendement des cultures. Il est également contenu dans la matière organique du sol sous des formes non assimilables par les plantes et doit être oxydé sous forme de sulfate par les microorganismes du sol. Les plantes l'utilisent comme sulfate, mais il existe un risque de perte par drainage.

1.5. Cycle d'eau : Cadre général

1.5.1. Le grand cycle de l'eau

L'eau existe sur Terre sous plusieurs formes : l'État solide (glace), liquide ou gazeux (vapeur d'eau). En conséquence, sa distribution est très variée. Elle est présente en abondance dans de nombreuses régions mais se fait plus rare dans d'autres.

L'eau est en mouvement continu dans ses différents états. Les océans, les rivières, les nuages et la pluie se trouvent toujours en état de changement (les eaux de surface s'évaporent, l'eau des nuages se précipite, les précipitations s'infiltrent dans le sol, etc.). Toutefois, le montant total de l'eau ne change pas et la Terre est essentiellement un *système fermé*. La même eau formée depuis des millions d'années sur cette planète est toujours présente.

Les parties du cycle de l'eau sont :

a) Évaporation et transpiration : L'énergie thermique du soleil transforme l'eau à la surface de la Terre en vapeur d'eau par *évaporation*. Les sels restent à la surface et seule l'eau pure monte dans l'atmosphère. L'eau s'évapore également du sol, des animaux et des plantes. L'évaporation de l'eau et des plantes se nomme transpiration.

b) Condensation : Au fur et à mesure que l'air s'élève, il refroidit et ne peut retenir toute cette vapeur d'eau. Par *condensation*, cette dernière redevient liquide. De minuscules gouttelettes s'agglutinent autour des particules de poussière pour former des nuages ou du brouillard.

c) Précipitations : Les nuages renferment finalement une telle quantité d'eau que les courants atmosphériques sont incapables de la retenir. L'eau tombe alors sur terre sous forme de *précipitations* : pluie, grêle, neige fondue ou neige.

d) Glace : La neige qui tombe dans les montagnes ou les régions polaires ne fond pas et peut s'accumuler pendant des années. Peu à peu, la neige ainsi accumulée et la pression qu'elle exerce changent les couches inférieures de neige en glace, ce qui forme alors un glacier.

e) Eau de ruissellement : L'eau qui s'écoule à la surface du sol est l'*eau de ruissellement*. Elle se jette dans les rivières, les lacs et les océans. Lorsque l'eau remplit une *cuvette*, une dépression naturelle, elle forme un lac.

f) L'eau souterraine : L'eau qui a pénétré le sol, traverse le gravier, le sable, la terre et les roches et revenient ensuite dans les rivières, les lacs et les océans.

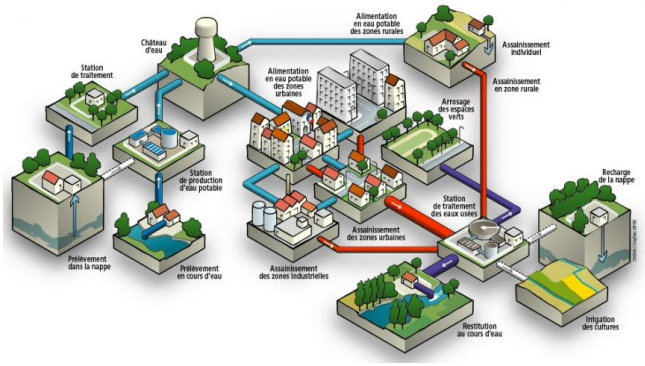
De toute l'eau sur Terre seulement 2.5 % de l'eau est douce (cf. annexe I.D). De surcroît, l'accès à l'eau est très difficile, car elle est principalement présente sous terre ou dans les glaces polaires et les glaciers, ce qui ne facilite pas son utilisation. Seulement 0,003 % du volume total de l'eau de la planète est disponible pour la consommation humaine (Shiklomanov's *et al.* 1993).

Grâce au cycle de l'eau (ou cycle hydrologique), l'eau se déplace de façon discontinue d'un endroit à l'autre et d'un état à un autre avec un temps de cycle estimé à 1.5 semaine pour l'eau dans l'atmosphère à 1000 ou 10000 années pour l'eau des glaciers et le permafrost (cf. annexe I.D). Une connaissance profonde des fondements de ce cycle est indispensable à la fois pour comprendre l'impact des activités humaines et pour planifier l'utilisation rationnelle et efficace de l'eau, ce qui sera expliqué dans la section suivante.

1.5.2. Le petit cycle de l'eau

Le *petit cycle de l'eau* (figure 1.5.2.1) corresppond aux usages domestiques de l'eau (production, distribution de l'eau potable et traitement des eaux usées).

Figure 1.5.2.1 Le petit cycle d'eau



Source : Observatoire national sur les services publics d'eau et d'assainissement

Ce cycle présente l'eau disponible pour chaque individu. Le Courrier de l'UNESCO (1999) précise :

> *« De combien d'eau un terrien dispose-t-il en moyenne ? D'un volume deux fois plus petit qu'il y a 50 ans. En 1950, les réserves mondiales (après déduction de l'eau utilisée par l'agriculture, l'industrie et les ménages) se montaient à 16 800 mètres cubes par personne et par an. Elles sont aujourd'hui tombées à 7 300 mètres cubes et devraient se limiter à 4 800 mètres cubes dans 25 ans. »* .

À partir de ce courrier, une ligne d'analyse peut être développée pour intégrer les enjeux biophysiques du cycle de l'eau et d'autres questionnements tels que (Burlat, 2009) :

- Le nécessaire diagnostic amont (politique) du jeu d'acteurs ;
- L'assainissement, de l'hygiène à la pollution : des choix politiques ?;
- L'assainissement, le coût de l'intérêt collectif.

Pour étudier les interactions entre les divers éléments du petit cycle de l'eau, il est utile de classer ces éléments en différents systèmes d'usages de l'eau[26].

L'utilisation de l'eau peut être définie à partir des objectifs de l'utilisateur. L'utilisation est alors caractérisée par rapport à la sphère économique puisqu'elle correspond à un objectif de production ou de consommation.

Les utilisations de l'eau peuvent être déclinées en trois grandes catégories (CPA SAGE – Onema)[27] :

[26] Plus de détails sur les usages de l'eau voir l'annexe I.D.

1. Les utilisations de l'eau considérées par rapport à la sphère économique.

D'une part, ces utilisations correspondent essentiellement aux préoccupations des agents économiques :

- alimentation humaine et autres utilisations domestiques (sanitaires, climatisation, décor) ;
- production ;
- transport (voie navigable, flottable) ;
- commerce et autres services ;
- utilisations sociales (services publics), culturelles (récréation) ou rituelles ;
- sécurité (incendie, protection, défense).

D'autre part, l'eau est directement utilisée dans la production :

- agricole (végétale), élevage (abreuvement), pisciculture et aquaculture ;
- industrielle (utilisations spécifiques à des produits, des processus de fabrication, de conditionnement, de conservation), y compris la production d'eau potable (même si c'est un cas particulier) et énergétique ;
- utilisations induites par les activités de production (alimentation et hygiène du personnel, entretien, sécurité des installations).

2. Les utilisations de l'eau considérées par rapport au milieu naturel peuvent être subdivisées en deux catégories :

- Les *utilisations captatrices* qui détournent l'eau du milieu naturel, et pour lesquelles les actions de prélèvement et de restitution au milieu et qui sont séparées dans l'espace et dans le temps ;
- Les utilisations *in situ* qui ne détournent pas l'eau du milieu naturel, mais font usage, sur place, de certains potentiels fonctionnels de l'eau.

3. Les *neutralisations* de l'eau

   Elles constituent des utilisations de l'eau qui visent à atténuer des préjudices ou à supprimer des obstacles. Ces neutralisations se définissent au regard des objectifs qu'elles poursuivent :

- sécurité des personnes et des biens (par maîtrise des crues) ;
- occupation du sol, construction, viabilisation (par évacuation des eaux pluviales) ;
- occupation du sous-sol (par dénoyage) ;
- production agricole (par assainissement du sol) ;
- production minière (par extraction) ;
- sécurité des transports et communications (par maîtrise des crues, évacuation des eaux).

[27] Les usages ont été consultés sur le site: *http://www.onema.fr/sites/default/files/pdf/chapitre1-2.pdf* (site consulté le 26 juin 2015).

Aujourd'hui encore, les détails spatiotemporels du grand cycle de l'eau apparaissent parmi les plus grandes complexités de notre planète. Dans le petit cycle, l'eau potable est essentielle pour la vie humaine, mais le manque d'accès à l'eau fraîche et propre pour la consommation et à l'assainissement est un problème actuel produit par l'expansion du métabolisme urbain. Ce thème de l'appropriation des ressources sera exploré dans la deuxième partie de la thèse.

CONCLUSION DE LA PARTIE I

La description physique des cycles biogéochimiques avait pour objectif d'éclaircir la structure et les échanges entre les composantes du système qui ont contribué à rendre possible une analyse des opportunités d'amélioration de changement de flux physiques dans un cycle. Il est donc particulièrement difficile de donner une vision globale, fixe et homogène de la configuration actuelle de chaque cycle comme l'ont démontré des nombreux chercheurs depuis le début de l'engagement contre le changement climatique, même si des arrangements ont été passés pour donner une perspective durable aux cycles. Notre analyse tend à faire ressortir la place centrale dans le contexte planétaire de la préoccupation pour l'altération des cycles naturels bien que la biosphère nous semble encore dépendante des paramètres physico-chimiques de chacun des compartiments de la terre comme l'atmosphère, la lithosphère et l'hydroptère.

Dans les débats sur l'anthropogénie, l'évolution des cycles connaît actuellement une phase de développement dans laquelle la convention n'est plus industrielle, comme c'était le cas pendant la révolution industrielle. De nos jours, le développement d'activités plus durables est considéré comme une occasion à saisir dans une vision de l'économie verte, en admettant que jusqu'aujourd'hui persistent des activités comme le système extractif des matières premières (phosphore et azote). Nous nous posons la question de savoir si l'économie rurale et urbaine a fait un usage *optimal* des ressources.

Une hypothèse prospective de la voie linéaire est que l'usage des matières premières met son empreinte sur la biosphère, dont l'économie est fondée sur une consommation des matières premières et une production de déchets tournée vers la biosphère. Mais à la différence de la voie complètement linéaire, les cycles de la biosphère ne semblent pas être complètement calqués sur cette voie linéaire.

Le parcours des molécules des cycles, même hétérogènes, a du mal à se départir d'une structuration très complexe. Sur le plan théorique elles ne portent généralement qu'un intérêt limite aux questions biophysiques, soulignant d'ailleurs qu'il a été très éloigné d'un cadre qu'intègrent d'autres domaines plus socio-économiques. Un cadre que permettrait d'élargir le domaine d'analyse des relations nature-nature vers des relations nature-homme, pour répondre à la question de la circularité dans les grands cycles de la biosphère.

Si l'on raisonne à partir des relations nature-nature, on peut constater que certains parcours de molécules peuvent être circulaires et linéaires en dépendant de la temporalité de cycle, dans cette perspective, l'agriculture du cycle annuel fait un usage extrêmement intensif de produits chimiques qui polluent les sols et les cours d'eau basés sur des cycles très longs comme la synthèse naturelle d'azote et de phosphore. Cette notion du temps de cycle nous aidera à cadrer les discussions sur la mesure des cycles des parties II et IV, mais sur tout fournira un cadre pour la compréhension de la structure de la relation autour du sujet des opportunités d'économie circulaire, qui seront l'objet des analyses de la Partie V.

PARTIE II.-TRANSITION ECONOMIE CIRCULAIRE : DE QUOI S'AGIT-IL ?

2. APPROCHE BIOPHYSIQUE DANS L'ECONOMIE CIRCULAIRE

TOUT D'ABORD LE CAS D'UN BOUCLAGE DE FLUX EN ECONOMIE ECOLOGIQUE présente une approchée biophysique, puisque ce cadre permet l'intégration des processus de la biosphère pour former des boucles vertueuses (par exemple, le captage de CO_2 par les plantes pour une exploitation ultérieure bioénergétique), l'économie circulaire entraine une réduction de la consommation des ressources naturelles épuisables par déplacement vers les systèmes environnementaux, une réduction de la consommation des énergies fossiles épuisables et une réduction des émissions nettes du déchets matériels.

2.1 L'économie circulaire selon l'économie écologique

L'économie écologique s'est construite dans les années 1960 - 1970 en opposition à un système antropogénique où la croissance sans fin des flux économiques et physiques menaçait de détruire l'environnement. De même cette nouvelle économie plus écologique a proposé des modèles économiques plus durables en intégrant le concept d'une économie stationnaire forgé par Kenneth E. Boulding (Boulding, 1973 ; Daly, 1991) où la consommation des ressources est maintenue à un niveau constant qui ne détruit pas l'environnement au-delà de sa capacité de régénération. Cette structure est composée d'un stock des biens de consommation et de production, des services comme la rente donnée par la consommation et d'un *thoughtput* ou flux physique entropique. Nicholas Georgescu-Roegen (1971) a également fait valoir l'idée que, sur la base de la thermodynamique, la croissance économique illimitée est physiquement impossible.

Trois types de systèmes

Pour continuer, ces flux de matière et d'énergie sont reliés entre eux par un système de relations thermodynamiques. Selon Baumgartner (Baumgartner, 1999, 2005), il faut distinguer trois types de systèmes thermodynamiques :

1. Le système isolé, lequel n'a pas échangé de matière ou d'énergie avec l'environnement en dehors du système ;
2. Le système fermé, lequel n'a pas échangé de matière, mais échange par contre l'énergie avec l'environnement dehors du système ;
3. Le système ouvert, lequel échange la matière et l'énergie avec l'environnement en dehors du système.

Deux lois de la thermodynamique

Concernant ce classement des systèmes, il est possible de discuter du système à utiliser pour caractériser la biosphère, mais il convient selon nous de poser la question sous un angle un peu différent. La question de la réussite d'un système thermodynamique n'a de sens que dans la mesure où il est relié aux limites et à leur échelle temporelle. Il est donc légitime de s'interroger sur la capacité des systèmes, à porter ou conserver l'équilibre. La *première* et la *deuxième loi* de la thermodynamique permettent de caractériser cet équilibre.

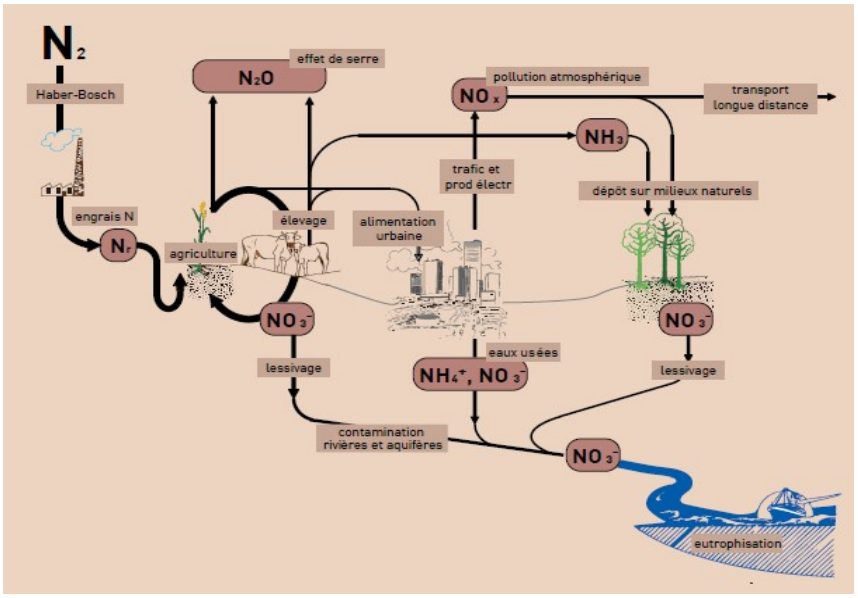
D'une part, la *première loi* de la conservation de l'énergie ou première loi de la thermodynamique : transmettent et dissipent l'énergie du système qui les produit dans un état proche de l'équilibre thermodynamique en raison de l'échange d'énergie (solaire et calorifique) et de matière entre l'atmosphère, l'hydrosphère, la lithosphère et la biosphère à une température, pression et limite spatiale à un moment donnée dans le temps (O'Connor, 1991).

D'autre part, la *deuxième loi* de la thermodynamique ou principe de Carnot établit l'irréversibilité des phénomènes physiques, ainsi que la réversibilité ou irréversibilité de ces transformations entropiques, nées des travaux de Carnot (Carnot, 1824, 1990) et de Clausius (Clausius, 1991). De plus, la thermodynamique peut être divise en deux branches : d'un côté, le travail sur la thermodynamique des processus irréversibles dont des systèmes en mouvement (donc, déséquilibre) impulsés par Prigogine (Prigogine, 1996 ; Lagrée, 2013). D'un autre côté, la thermodynamique statistique instiguée par Boltzmann (Boltzmann, 1987), étendue à la théorie de l'information de Brillouin (Brillouin, 1959). Plus récemment en 2013 Loiret mesure l'entropie à travers la distance de l'équilibre thermodynamique où indice *Ka*, lequel en utilisant une variable territoriale (m^2) donne un indice de diversité *structurelle* (en Km^3) synthétisant toutes les variations spatiales d'un territoire (Loiret, 2013).

Réversible versus irréversible

L'*irréversibilité* peut être utilisée pour caractériser certaines réactions comme des cascades (un point que nous traiterons à la page suivante de manière plus détaillée), lesquelles ne peuvent se dérouler que dans le sens direct, par exemple la décomposition des aliments ou la cascade de l'azote.

Figure 2.1.1 : Cascade de l'azote



Source : Billen *et al.* 2011

Une cascade de processus irréversibilité

La deuxième loi de la thermodynamique permettra de formuler notre approche pour analyser les pressions exercées pour les activités du système socio-économique sur le capital naturel à travers d'une vision en cascade ou principe d'irréversibilité des phénomènes physiques. Également, ce système peut être formulé à travers de quatre processus (P) et trois flux (F) du cycle de carbone:

(P1)-Extraction

\

F1

\

(P2)-Émissions

\

F2

\

(P3)-Fixation

\

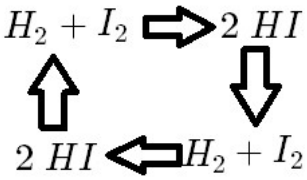
F3

\

(P4)-Fourniture

En outre, la notion de *réversibilité* permet une réaction, qui peut se produire dans le sens direct autant que dans le sens inverse comme dans un cycle de la figure ci-dessous.

Figure 2.1.1.2: La notion de réversibilité et d'irréversibilité du cycle de l'hydrogène



Source : L'auteur

Un cycle réversible

Comme il a déjà été mentionné, le cycle de l'azote est le cycle biogéochimique par lequel l'azote est utilisé comme numéraire échangeable entre la biosphère, la lithosphère, l'hydrosphère et l'atmosphère de la terre. Également, l'azote est l'élément le plus important des organismes vivants après O, H et C, dans sa forme redue (NH_4^+ et NH) et dans sa forme oxyde (NO_x, HNO_3, N_2O, NO_3-). De plus, ce système cyclique peut être caractérisé à travers de quatre processus (P) et quatre flux (F) :

(P1)-*Extraction* ----------F1---------- (P2)-*Émissions*

↑ ↓

F4 F2

↑ ↓

(P4)-*Fourniture* ----------F3---------- (P3)-*Fixation*

Extraction : Les matières premières comme le NO_2- et le NO_3- sont prélevées par la fertilisation agricole à travers d'un processus d'extraction.

Émissions : L'économie rejetée des émissions comme les NO-, NO_2, N_2O et le N_2 à l'atmosphère, les NO_3- , NO_2- et NH_4+ à l'hydrosphère.

Fixation : Ce compartiment doit arriver à stocker le N_2 en la biosphère, ou neutraliser les émissions de HNO_3, lequel produisent la pluie acide en l'atmosphère et l'eutrophisation en l'hydrosphère.

Fourniture : La source que fournit des matières premières comme l'ammoniaque (NH_3), le nitrate (NO_3-) et le - KNO_3.

Dans un contexte de réversibilité, les choix ne sont pas décisifs pour l'avenir. Par contre, il est toujours possible de revenir en arrière. De même, en matière d'entropie Herman Daly a fait prendre conscience de l'irréversibilité du processus de dégradation du capital naturel. De plus, comme nous l'avons déjà mentionné au début du chapitre, Daly a caractérisé le type de développement de la biosphère à travers la théorie de l'état stationnaire duquel les activités sont relativement stables, ne favorisant ainsi ni la croissance ni la décroissance en thermes biophysiques (O'Connor, 1996).

Du fait de l'existence de certaines réactions en cascades ou de certaines réactions complètement cycliques, différentes méthodes de traitement des grands cycles biochimiques appairassent. En outre, l'État actuel de nos connaissances ne nous permet pas de savoir comment traiter toutes les pollutions de type global. Cet appel au long terme peut être expliqué par les temps de résidence de gaz du GES : CH_4 7 à 10 ans, CO_2 100 ans et N_2O 170 ans.

Cette nouvelle considération plaide en faveur d'un accroissement de la compréhension des processus circulaires ou semi-circulaires au sein des cycles de la biosphère. Kenneth Boulding (1966) a pris en compte cette question dans son modèle d'économie du vaisseau spatial pour caractériser la biosphère comme un système serré. Ce système serré est souvent confronté à des phénomènes irréversibles comme la destruction et la disparition d'écosystèmes et d'espèces naturelles.

Trois catégories de processus

Dans ce contexte de réversibilité ou irréversibilité, trois catégories de processus principaux peuvent être définies dans la biosphère:

Les processus présents *dans le grand cycle* : il s'agit de processus non gérés par l'homme (processus de transport de substances dans l'océan ou changement climatique) (cf. la première sphère de la figure A du chapitre I).

Second, les processus présents dans *le cycle moyen* : il s'agit de processus partiellement gérés par la nature comme l'agriculture, qui peuvent être appelés *la nature domestiquée*. Ce type de processus est piloté par l'homme, mais il n'est pas maîtrisé par celui-ci du début à la fin. Il existe nombre variables déterminées par des éléments exogènes au système (cf. la figure A du chapitre I).

Troisième, les processus présents dans *le petit cycle* : il s'agit de processus complètement pilotés par l'homme du début à la fin (par exemple la manufacture des biens et des services), les processus peuvent être démarrés et arrêtés quand on veut. Un exemple est le processus de fabri**c**ation des chaussures.

Finalement dans cette perspective de trois catégories de processus principaux dans la biosphère. L'ambition sera de faire un classement des actifs environnementaux (Loiret, 2011; Douguet *et al.* 2014), en utilisant les quatre sphères des actifs environnementaux proposées par O'Connor *et al.* (2009) (cf. tableau 2.1.1).

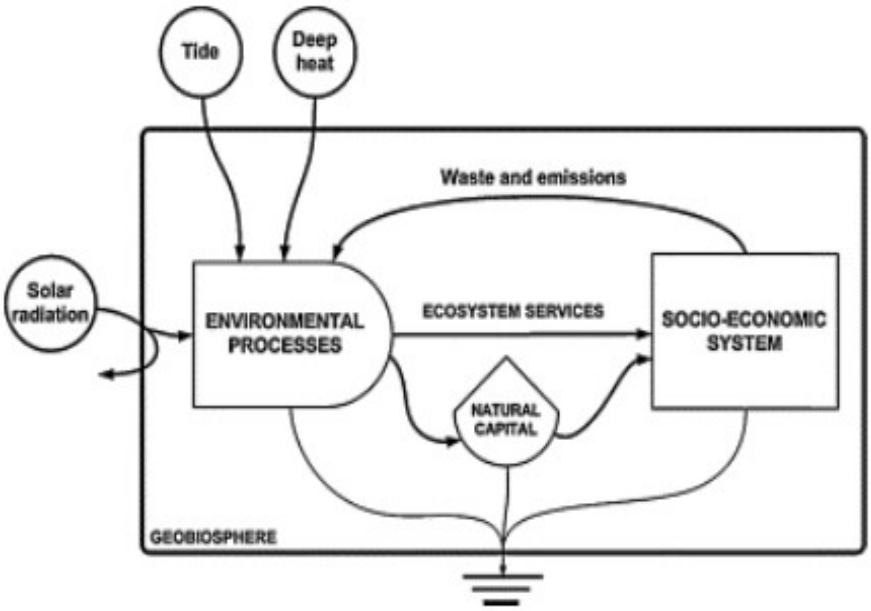
Tableau 2.1.1 : Les actifs environnementaux

SPHERE	COMPARTIMENT OU SECTEUR DES ACTIFS ENVIRONNEMENTAUX
BIOSPHERE	*La biodiversité terrestre, des milieux aquatiques et de l'air* [avec des sous-divisions pour les ressources « gérées » et sauvages, exploitées et «non exploitées», etc.]
LITHOSPHERE	*Les sols productifs* [les divers types du sol pouvant être distingué, par la qualité, précipitation, etc., et aussi par rapport à des différents usages (production alimentaire, bioénergies, etc.)]
	Capital du sous-sol [les ressources minérales, dont l'or, mais aussi d'autres métaux, des granulats et d'autres matières utilisées dans les réseaux routiers et la construction]
HYDROSPHERE	*Eau douce* [y compris les eaux de surface et les eaux souterraines avec ses principaux organes]
	Ressources en eau marines [quantitativement inépuisable, mais quantitativement variable]
ATMOSPHERE	*Système climatique* [un système complexe depuis le rayonnement du soleil comme un flux d'énergie et soutien de vie jusqu'aux flux et échanges des GES (gaz à effet de serre) avec les sols, la biomasse et les océans]
	La qualité de l'air [l'atmosphère du point de vue de la santé humaine et aussi celle du vivant non humain par extension].

Source : O'Connor *et al* 2009.

Face à ce nouveau classement lancé, la biosphère peut être caractérisée comment un ensemble de sous-systèmes régis par les lois de la thermodynamique et par des limites physiques (figure 2.1.1.3).

Figure 2.1.1.3: L'économie et la biosphère



Source : Hayha *et al.* 2014

En addition, l'entropie dépendra de certains enjeux économiques (Daly, 1992; Ayres, 1989, 1998, 1999; Bianciardi *et al.* 1993; Kummel, 1994; Kaberger *et al.* 2001). Afin de réussir, l'approche de René Passet exprime par le concept de *serre l'activité économique* dans le grande boucle de la biosphère (Passet, 1996).

Les cycles de la planète terre peuvent être aussi caractérisés comme un *continuum* entre le premier processus non géré par l'homme et le processus complètement piloté par l'homme.

Même si cette position est complexe, un débat fondamental est généré sur la réinsertion dans un mouvement cyclique des processus non gérés par l'homme : ils peuvent être gérés comme dans les processus 2 (de cycle moyen) ou 3 (de petit cycle).

Cette transition peut être illustrée à travers les trois processus :

1. Les saumons sauvages (processus du grand cycle) qui viennent de l'océan peuvent être mangés dans le processus 3 (de petit cycle);

2. Le pilotage dans l'élevage de saumons dans les fiords peut être partagé entre l'homme et la nature dans le processus 2, ce type de processus est piloté par l'homme, mais il n'est pas matricé par l'homme du début à la fin parce qu'il y avait nombre variables déterminées par des éléments exogènes au système ;

3. Dans le processus 3, le saumon est élevé dans une piscine fermée. Il s'agit d'un processus complètement piloté par l'homme du début à la fin, il utilise certains équipements technologiques afin de réussir le processus.

En définitive, cette transformation des processus consiste à classer et faire évoluer les modèles actuels de production et de consommation vers une vision du système plus complexe, à travers une logique de réciprocité et d'échange entre les trois catégories de processus dans un univers de processus non contrôlés (O'Connor, 1986, 1989).

2.1.1. Processus et transferts dans les cycles de la biosphère

Au début de ce chapitre est présentée une vision systémique qui donne un cadre à notre recherche. Dans cette vision, plusieurs relations peuvent être définies pour formaliser cette approche, comme par exemple, la structure du système, lequel ne change pas dans le temps. Dans ce sens, la définition d'une structure de système proposée par Georgescu Roegen comme un *path of process* dans ses ouvrages de 1966 et 1971 peut être utile pour formuler notre cadre. Ensuite, l'objet d'étude va être défini en utilisant ses relations avec le système ou l'environnement.

Les concepts de fond, transfert et processus

Plus formellement, les relations peuvent être définies comme:

1- Le modèle contient une liste des éléments impliqués dans le système, lesquels sont classés en *fonds et transfert*, tandis que le temps apparaît comme une dimension explicite du processus.

2- Le modèle porte sur le *processus* de production comme un ensemble d'opérations coordonnées et exécutées par des éléments complémentaires à l'autre et dont les actions sont disposées en plusieurs phases, selon une séquence temporelle.

3- Les *fonds* sont caractérisés par leur capacité à fournir des services pendant un certain intervalle de temps. Par conséquent, les fonds entrant et sortant du processus sont comme des éléments immuables. Nous pouvons trouver dans les *fonds* les installations et les équipements de production.

Après la définition d'une structure du système, les processus peuvent être définis en utilisant cette structure avec une durée déterminée de processus.

Dans la vision de Sraffa, cette durée va être comprise comme une durée agricole ou industrielle. D'une part, la période de culture ou rotation dans l'agriculture est annuelle. D'autre part dans la production industrielle instantanée, il est possible d'utiliser nombre travail comme facteur productif durant la journée, mais à la fin de la journée le travail est fini, ce sujet sera abordé au chapitre V.

Les trois visions de *Fund-Flow*

Dans la prise en compte la structure du système dont trois visions peuvent être appliquées.

La première a été proposée par Georgescu Roegen. C'est modèle *Fund-Flow* qui a été étudié par Piacentini (1995), il sera détaillé en annexe II.A. De plus, le modèle est composé d'une partie fixe et non changeable dans le processus qui est le fond ou *fund*, lequel reste du début à la fin, et d'une autre changeable qui peut être appelé le flux ou *flow*, cette structure a été explorée par Kurz *et al.* (2003).

La deuxième approche *flux-flux* a été étudiée par Sraffa et Von Neumann. Cette approche permet également de réduire la circulation du capital fixe au sein de la production jointe et permet un traitement adéquat de la dépréciation des machines (Kurz *et al.*2003).

Sraffa appelle le *fund (le capital fixe)* et Georgescu Roegen l'appelle simplement *le fond*. De plus, dans le langage de Sraffa, il peut y avoir une dépréciation ou une diminution de la valeur. Mais ses diminutions ou dépréciations dépendent du type du capital ; les machines d'une usine peuvent être dépréciées, mais nous ne pouvons pas utiliser le même raisonnement pour la terre. Dans un exemple, le processus de dépréciation de la machine suit un parcours irréversible ou en cascade irréversible. Un phénomène de dépréciation similaire se produit avec les travailleurs pendant le processus de production, lesquels à la fin de la journée sont fatigués et ont besoin de repos pour se remettre en forme avant la journée suivante, ce principe sera exploré dans la partie V de la thèse. En outre, Georgescu Roegen (1969, 1971, 1976) suggère que les activités dédiées à la récupération, entretien et réparation des fonds donc infrastructures et travailleur doivent être étudies comme des processus séparés, ce qui simplifie l'analyse.

La troisième approche *processus-transfert* considère deux composantes fondamentales : le processus et le transfert. Le processus utilise également des inputs dans une *structure fixe* ou *fond* pour produire un output, le transfert des matières permet la communication entre processus en amont et en aval. Dans cette vision, un processus peut être défini par des entrées, sorties et fonds. Donc, nous avons des matières qui entrent dans les processus, lesquels plus tard, sortent des processus comme une sortie traversant la barrière vers un autre processus. Après cette description, les entrées (*input*) et les sorties (*output*) peuvent être quantifiées en utilisant la simplification suivante : la matière qui entre au début de processus peut être définie comme *input* et la matière qui sort en fin de processus peut être définie comme *output*.

En outre, l'enjeu distributif peut être approfondi en utilisant la notion de temps. Dans ce cas, tous les *outputs* qui sortent dans la période T sont utilisés comme des *inputs* dans la période $T+1$. Le passage de matière entre les processus peut être défini comme un transfert. Nous voulons introduire une importante formalisation méthodologique dans laquelle tous les inputs dans la période $T+1$ sont générés par des *outputs* qui viennent de la période T. L'énergie et la matière peuvent également être conservées en conditions idéales en utilisant la deuxième loi de la thermodynamique, à travers un système de flux et de stockage composé par processus et transfert entre de processus. De même, cet enjeu distributif de matière entre processus a été étudié par Daly (1968), Victor (1972) et Perrings (1998). Après avoir exposé cette typologie de trois types de relations, ils

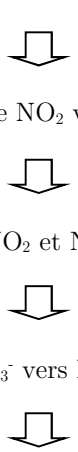
vont l'approfondir avec quelques exemples du cycle de l'azote en utilisant la notion de cycle et de cascade déjà montrée au début du chapitre. Cette notion nous permettra d'avoir un cadre théorique pour la cinquième partie de la thèse.

Cascade de l'azote aux milieux naturels

La cascade de l'azote désigne le cheminement dans les milieux naturels à travers des transformations et transferts dans des compartiments de la pédosphère, de la biosphère et de l'atmosphère, d'un atome d'azote.

Les figures et le tableau 2.1.1.1 détaillent les processus et les transferts de l'azote dans le milieu naturel.

Figure 2.1.1.4: La cascade de l'azote dans les milieux naturels



Source : L'auteur

Tableau 2.1.1.1: Transfert dans la cascade de l'azote dans les milieux naturels.

Nombre	*Description*	*Input*	*Output*
Transfert de NO_2 vers la forêt	Le transfert de NO_2 entre les processus dans l'atmosphère et le processus de dépôt sur les milieux naturels (forêts).	NO_2	NO_2
Transfert NO_3^- vers l'hydrosphère	Le transfert de NO_3^- entre les processus économiques (agriculture et activités urbaines) et les processus écologiques d'eutrophisation de l'hydrosphère.	Nitrate	Nitrate

Source : L'auteur

Tableau 2.1.1.2: Processus de la cascade de l'azote dans les milieux naturels.

Nombre	*Description*	*Input*	*Output*	*Fonds*
Processus de transformation de NO dans l'atmosphère	Les NO proviennent essentiellement de la combustion des combustibles fossiles et de quelques procédés industriels (production d'acide nitrique, fabrication d'engrais, etc.). L'oxydation du NO produit par les combustions peut se poursuivre dans l'atmosphère en produisant du NO_2.	NO	dioxyde d'azote	atmosphère
Processus de dépôt de NO_2 et NH_3 sur milieux naturels	Les processus écologiques dans la forêt utilisent le NO_x de l'atmosphère et le NH_3 (transfert de NH_3 vers les milieux naturels) comme des inputs. Ils jettent NO_3^- (output) dans la mer (transfert NO_3^- vers l'hydrosphère).	NO_2 et NH_3	NO_3^-	La forêt
Processus d'eutrophisation de l'azote	Les processus écologiques d'eutrophisation de l'azote dans l'hydrosphère utilisent NO_3- provenant surtout des nitrates agricoles (transfert NO_3^- vers l'hydrosphère), ces nutriments dopent la production de phytoplancton et de quelques espèces aquatiques, en augmentant la turbidité et la sédimentation de l'eau.	NO_3^-	production de phytoplancton	Hydrosphère

Source : L'auteur

Cascade de l'azote dans l'agriculture

La cascade de l'azote désigne le cheminement dans l'activité agricole à travers des transformation et transfert dans des compartiments de la pédosphère, de la biosphère et de l'atmosphère, d'un atome d'azote.

Figure 2.1.1.5: La cascade de l'azote dans l'agriculture

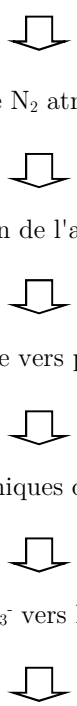


Tableau 2.1.1.3: Transfert dans la cascade de l'azote dans l'agriculture.

Nombre	*Description*	*Input*	*Output*
Transfert de N_2 atmosphérique	Transfert entre les processus de N_2 dans l'atmosphère et la fixation de N_2 à travers un processus économique (Haber-Bosch).	N_2	N_2
Transfert de l'azote vers prairies et élevages	Transfert entre les processus fixation de N_2 (Haber-Bosch et fixation écologique) et les processus économiques d'utilisation de l'azote dans les prairies.	Nitrate	Nitrate
Transfert NO_3^- vers l'hydrosphère	Transfert de NO_3^- entre les processus économiques (agriculture et activités urbaines) et les processus écologiques d'eutrophisation de l'hydrosphère.	Nitrate	Nitrate

Source : L'auteur

Tableau 2.1.1.4: Processus de la cascade de l'azote dans l'agriculture.

Nombre	*Description*	*Input*	*Output*	*Fonds*
Processus de formation du N_2 dans l'atmosphère	Le processus écologique forme diazote (N2) dans l'atmosphère à partir du dioxyde d'azote réduit(NO2).	NO_2	N_2	atmosphère
Processus de fixation de l'azote (Haber-Bosch)	Le procédé *Haber-Bosch* a une importance économique considérable, car permettant la conversion industrielle de l'azote atmosphérique en ammoniaque puis en acide nitrique. Le procédé implique la réaction sous forte pression et à haute température du diazote avec l'hydrogène.	l'azote atmosphérique	ammoniaque et acide nitrique	Usine
Processus économiques dans l'agriculture	Les processus économiques dans l'agriculture utilisent azote surtout des nitrates agricoles (Transfer NO_3^- vers l'hydrosphère), ces processus produisent une bien économique et un transfert de NO_3^- vers l'hydrosphère.	Nitrate	nitrate et produits agricoles	Sol agricole
Processus d'eutrophisation de l'azote	Les processus écologiques d'eutrophisation de l'azote dans l'hydrosphère utilisent NO_3^- provenant surtout des nitrates agricoles (transfert NO_3- vers l'hydrosphère), ces nutriments dopent la production de phytoplancton et de quelques espèces aquatiques, en augmentant la turbidité et la sédimentation de l'eau.	NO_3-	production de phytoplancton	Hydrosphère

Source : L'auteur

Cascade de l'azote industriel et urbain

La cascade de l'azote désigne le cheminement au niveau industriel et aux milieux urbains à travers les différents processus et transfert dans compartiments de la pédosphère, de la biosphère et de l'atmosphère, d'un atome d'azote.

Figure 2.1.1.6: La cascade de l'azote industriel et urbain

Source : L'auteur

Tableau 2.1.1.5: Transfert dans la cascade de l'azote industriel et urbain.

Nombre	*Description*	*Input*	*Output*
Transfert de l'azote vers les activités urbaines	Transfert de l'azote (fixe pour le processus Haber Bosch) vers les processus économiques.	NO_2	NO_2
Transfert de NO_x vers la pollution atmosphérique	Les processus économiques produisent NO_x est un gaz. Lequel participe dans le processus de pollution atmosphérique. Les rejets de NO_x ($NO+NO_2$) proviennent essentiellement de la combustion de combustibles de tous types (gazole, essence, charbons, fiouls, GN...). Ils se forment par combinaison de l'azote (atmosphérique et contenu dans les combustibles) et de l'oxygène de l'air à haute température. Tous les secteurs usagers de combustibles sont concernés, en particulier les transports routiers. Enfin, quelques procédés industriels émettent des NO_x en particulier la production d'acide nitrique et production d'engrais azotés.	NO_x	NO_x

Source : L'auteur

Tableau 2.1.1.6: Processus de la cascade de l'azote industriel et urbain.

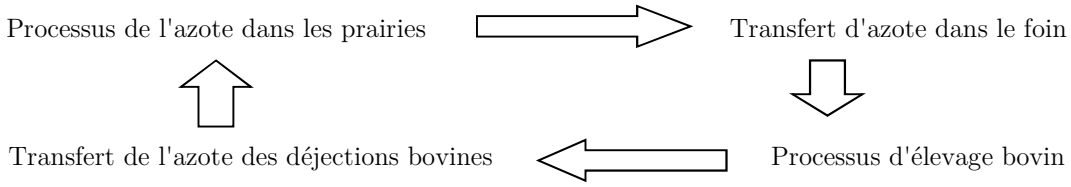
Nombre	*Description*	*Input*	*Output*	*Fonds*
Processus de fixation de l'azote (Haber-Bosch)	Le procédé *Haber-Bosch* a une importance économique considérable, car permettant la conversion industrielle de l'azote atmosphérique en ammoniaque puis en acide nitrique. Le procédé implique la réaction sous forte pression et à haute température du diazote avec l'hydrogène.	l'azote atmosphérique	ammoniaque et acide nitrique	Usine
Processus de l'azote urbain	Les processus économiques des grandes villes comme la production d'énergie, le trafic urbain, l'alimentation rejettent des émissions comme les NO^-, NO_2 à l'atmosphère et NH_4^+ dans l'hydrosphère.	Produits ammoniacaux divers, carton, papier.	Les NO^-, NO_2 à l'atmosphère et NH_4^+ à l'hydrosphère	Ville
Processus de transformation de NO dans l'atmosphère	Les NO proviennent essentiellement de la combustion des combustibles fossiles et de quelques procédés industriels (production d'acide nitrique, fabrication d'engrais, etc.). L'oxydation du NO produit par les combustions peut se poursuivre dans l'atmosphère sous la forme de NO_2.	NO	dioxyde d'azote	Atmosphère

Source : L'auteur

Cycle de l'azote dans l'agriculture

Le cycle désigne le parcours circulaire de l'azote dans l'agriculture à travers les différents transformations et transferts dans les compartiments de la biosphère et de la lithosphère d'un atome d'azote.

Figure 2.1.1.7: Le cycle de l'azote dans l'agriculture



Source : L'auteur

Tableau 2.1.1.7: Transfer dans la le cycle de l'azote dans l'agriculture.

Nombre	*Description*	*Input*	*Output*
Transfert d'azote dans le foin	Transfert entre les processus écologiques d'utilisation d'azote dans les prairies et les processus économiques d'élevage bovin. Les α-aminés jouent un rôle fondamental en biochimie comme constituants élémentaires des protéines dans le foin.	amines	amines
Transfert de l'azote des déjections bovines	Transfert entre les processus économiques d'élevage bovin et les processus écologiques d'utilisation de l'azote dans les prairies.	Ammoniac	Nitrate

Source : L'auteur

Tableau 2.1.1.8: Processus dans la le cycle de l'azote dans l'agriculture.

Nombre	*Description*	*Input*	*Output*	*Fonds*
Processus de l'azote dans les prairies	Les matières premières comme le NO_3- est apporté naturellement pour le sol (transfert de l'azote des déjections bovines) et d'une façon artificielle à travers du transfert du NO_3- vers prairies et élevages. Ils sont utilisés par un processus économique comme l'agriculture pour produire de la biomasse et N_20.	NO_3- (nitrate)	produits agricoles + N_20 vers l'atmosphère	Sol
Processus d'élevage bovin	Les processus économiques d'élevage bovin utilisé le flux d'azote dans le foin pour produire un transfert de NO_3- vers l'hydrosphère et autre transfert d'azote (ammoniac) de la déjection bovin.	amines dans le foin	nitrate et ammoniac	Vache

Source : L'auteur

2.2 Conclusion du Chapitre 2

La question de la nécessité d'une approche holistique pour étudier les cycles de la nature est aussi ancienne que l'économie. Ce qui est en jeu derrière le capitalisme, c'est sa capacité à *porter la vie*, on se reportera à *L'économique et le vivant* de René Passet (Payot, 1979 ; Passet 1996). Son approche exprime le concept de *serre l'activité économique* dans la grande boucle de la biosphère (Passet, 1996) de façon de répondre à cette question. Il convient donc de se placer dans une perspective holistique des concepts utilisés pour l'économie écologique et l'économie industrielle.

Dans le cas d'un recyclage en *économie écologique*, par l'intégration des processus de la biosphère pour former des boucles vertueuses l'économie circulaire entraîne une réduction de la consommation des ressources naturelles épuisables par déplacement vers les systèmes environnementaux, une réduction de la consommation des énergies fossiles épuisables et une réduction des émissions nettes du déchets matériels.

Finalement, ce chapitre a montré les processus et les transferts du cycle de l'azote, cela nous permettra de donner une structure à la discussion de la partie V de la thèse.

3. APPROCHES DE L'ECOLOGIE INDUSTRIELLE : 4R

COMME NOUS L'AVONS DEJA EVOQUE AU CHAPITRE II, la réflexion autour de l'économie circulaire est l'occasion de rassembler l'ensemble des questions sur la définition et l'intégration des boucles fermées. Dans cette intégration, plusieurs questions peuvent être proposées :

Existe-t-il une définition consensuelle de l'économie circulaire face au système linéaire actuel qui a montré ses limites ? Quelles sont les origines de cette approche ? Quels sont le périmètre et les principaux enjeux de cette nouvelle approche de l'économie ?

L'économie circulaire permet-elle de dissocier la croissance de l'utilisation des ressources naturelles non renouvelables de celles renouvelables ? Quel peut-être le rôle des acteurs publics dans cette démarche avec quelles actions pour l'accompagnement ?

Au-delà de la réduction de l'impact environnemental, quels sont les limites et les avantages de cette approche dans la création de valeur économique et sociale ? Quelles sont les démarches opérationnelles menées par les organisations dans cette logique d'économie circulaire ?

Qui sont les acteurs aujourd'hui engagés dans des démarches d'économie circulaire ? Quels secteurs sont actuellement porteurs et dans quels domaines ? Quelles sont les compétences nécessaires pour piloter cette démarche ? Quels sont les freins actuels et quels sont les axes de recherche à privilégier pour avancer dans cette voie ? En definitive, les sections 3.1 et 3.2 essaient de donner une réponse à cettes questions .

3.1 L'économie circulaire selon une vision industrielle.

L'économie circulaire repose sur le principe général, selon lequel les déchets des uns peuvent devenir la matière première des autres. Il convient donc de se placer dans une perspective holistique des concepts utilisées pour l'économie industrielle.

Dans le cas d'un recyclage en *écologie industriel* qui propose d'utiliser les *4R* (cf. la figure 3.1.1.3.), par le biais des processus économiques réunis en boucle, l'économie circulaire entraîne une réduction de la consommation des ressources naturelles, de la consommation d'énergie et des émissions nettes du déchets.

3.1.1 Définition et arguments.

Une définition

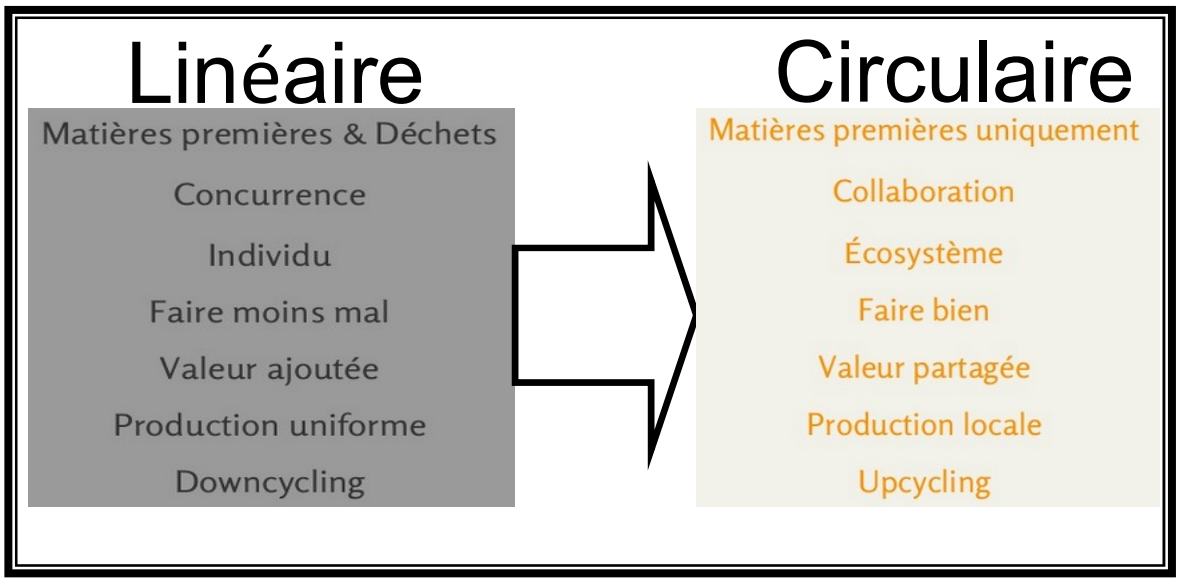
Comme nous avons déjà evoqué, l'approche de René Passet exprime le concept de *serre l'activité économique* dans le grande boucle de la biosphère (Passet, 1996). Il convient donc de se placer dans une perspective holistique, ce qui inclut le changement climatique, l'épuisement des ressources, la désertification, l'écart entre richesse et pauvreté, l'exode climatique… l'ensemble des signaux est aujourd'hui au rouge.

Nous voulons donner quelques argument pour justifier l'aplication de un'économie circulaire :

Premier argument : *Changer la logique linéare de production dominante pour une approche de circularisation des flux de matières et d'énergie.*

Il apparaît difficile de s'obstiner à s'accrocher au mythe, cher aux économistes classiques, de la surabondance des ressources (Bourg *et al.* 2010). Il apparaît tout aussi difficile de continuer de croire et d'attendre que la *main invisible d'Adam Smith* puisse nous sortir de cette crise écologique. Il apparaît même urgent de changer de modèle économique, de trouver un mécanisme qui permettra de contrôle la croissance des flux de matières et d'énergie. L'économie circulaire, en répondant à cet appel, essaie de changer la logique linéare de production dominante pour une approche de circularisation des échanges de flux de matières et d'énergie au sein d'un système anthropique global. Sur cette base, la capacité de l'économie circulaire à proposer un véritable changement de paradigme peut être interrogée (Braungart *et al.* 2009).

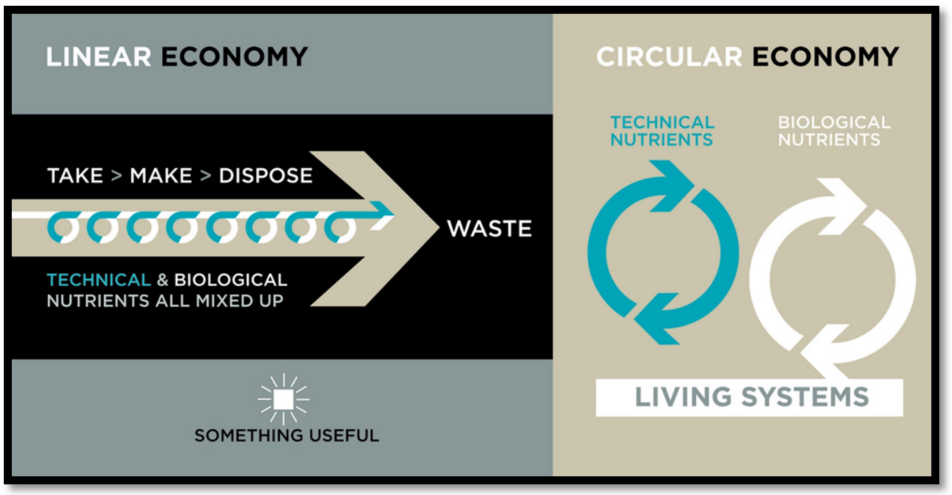
Figure 3.1.1.1. Changement de paradigme : De l'économie linéaire à l'économie circulaire



Source : L'auteur

Le passage d'un flux linéaire vers un flux circulaire[28] (figure 3.1.1.1) nécessite un véritable changement de modèle économique. Un changement de paradigme a également été constaté au niveau du prix de l'énergie et des ressources. Au cours du XXe siècle, ceux-ci ont constamment baissé, il est prévu que pour le siècle à venir cette tendance soit inversée et que l'on assiste donc à une augmentation constante, ce qui signifie que les problématiques d'approvisionnement pourraient devenir un enjeu majeur et une source de tensions politiques. De même, les gestions des stocks physiques existants permettront de fournir un certain niveau de sécurité aux nations dans la condition d'approvisionnement, on considère les biens d'aujourd'hui comme les ressources de demain, le business modèle qui rend cela possible consiste à vendre les services et non plus les objets eux-mêmes, afin que les acteurs économiques conservent la propriété de leurs produits et des ressources dont ils sont constitués, de manière à contribuer à leur propre futur approvisionnement et à la sécurité nationale.

Figure 3.1.1.2. Le passage d'un flux linéaire vers un flux circulaire



Source : *https://www.ellenmacarthurfoundation.org* (site consulté le 3 août 2015).

Deuxième argument : *Créer un cercle vertueux qui favorise la création d'emplois.*

Le second facteur fondamental réside dans le fait qu'une politique visant un avenir durable nécessite des solutions simples et convaincantes par exemple un système fiscal revu pour favoriser le long terme. Cela signifie simplement de ne pas taxer ce que l'on cherche à favoriser, ainsi les ressources renouvelables, ce qui inclut le travail humain et donc les salaires. Au contraire, il convient de taxer les énergies et les ressources non renouvelables. Le fait de ne pas taxer le travail permet de créer un cercle vertueux qui favorise la création d'emplois et dans les secteurs reposant massivement sur la main-d'oeuvre cela permet d'accroître la compétitivité des activités de production. Dans ce but, les effets bénéfiques sont bien-sûr aussi attendus dans le domaine des services à la personne.

Revenons au modèle circulaire, le premier point évoqué concernant le fonctionnement économique. Passons aux créations d'emplois au niveau régional. Selon Walter Stahel, les trois quarts de l'énergie utilisée pour la fabrication d'un produit sont investis dans l'extraction de matière première, la fabrication de l'objet lui-même ne requiert que 25% de l'énergie totale. L'inverse est vrai en ce qui concerne le travail humain : les activités

[28] Selon la fondation Ellen Mac Arthur, il s'agit d'une économie industrielle qui est, à dessein ou par intention, réparatrice et dans laquelle les flux de matières sont de deux types bien séparés; les nutriments biologiques susceptibles de réintégrer la biosphère, et les matériaux techniques, destinés à être revalorisés sans entrer dans la biosphère. Pour développement détaillé sur la démarche de la fondation Mac Arthur, consulter le site: *http://www.ellenmacarthurfoundation.org/fr* (site consulté le 3 août 2015).

d'extraction et de production de matière première ne représentent qu'un quart du total et la fabrication en engloutit trois quarts. Les activités de répartition et de remise en état du modèle circulaire, qui utilisent encore plus de travail que la fabrication, renforcent donc les secteurs de l'économie qui nécessitent de la main d'oeuvre et sont peu consommateurs en énergie. L'économie circulaire revient donc dans une certaine mesure à remplacer l'énergie fossile par le travail.

Troisième argument : *Créer une boucle vertueuse qui favorise les 4R.*

Le modèle circulaire repose sur un principe de maximisation des bénéfices, il existe un axiome, une règle implicite selon laquelle plus le cycle est court plus il est rentable et efficace en termes de ressources. En d'autres termes, ne réparez pas ce qui n'est pas endommagé, ne refabriquez pas ce qui peut être réparé, ne recyclez pas ce qui peut être manufacturé en l'état. Ce dernier point est le plus profitable, sur le plan financier comme sur celui des matériaux et ressources.

La réutilisation et la réparation sont des stratégies dont le meilleur usage est fait localement et au niveau régional pour éviter le doublement des coûts de transport. Par contraste, le recyclage tel qu'on le connaît est une affaire mondiale, fondée sur le recours à la main-d'œuvre la moins coûteuse possible, par exemple lorsque l'on envoie de vieux appareils électriques vers l'Afrique.

En outre, ce modèle vertueux réduit les émissions de CO_2 et gaz à effet de serre. De plus, le réemploi et la remise sur le marché de produits reconditionnés minimisent les apports d'eau et de ressources ainsi que les émissions, car ces stratégies permettent de conserver matériaux et énergie grise contenue dans l'objet. Ces économies, tout comme la prévention du déchets, sont des activités qui ont un impact positif sur les entreprises au niveau financier.

Figure 3.1.1.3. Les 4R.

Réduire : diminuer la quantité de matière ;

Réutiliser : changer l'usage d'un bien ou d'une partie de celui-ci permettre à une autre personne d'employer le bien si la personne initiale n'en a plus besoin ;

Réparer : augmenter la durée de vie du bien en panne ;

Recycler : valoriser le bien, par la récupération des matières premières.

Source : *www.michelin.com* (site consulté le 4 août 2015).

Le second principe à considérer c'est qu'une boucle n'a ni début ni fin. Il faut l'améliorer, ce qui revient à gérer les stocks, maintenir leur valeur, la qualité et les performances des produits et des matériaux. Ce principe exprime une des plus grandes différences par rapport au modèle linéaire, une boucle est un système continu.

Le troisième principe important concerne la vitesse du flux circulaire, ce qui est un aspect crucial, un modèle qui fonctionne sur la vente de services et non de produits opère très lentement. A l'autre bout du spectre, le recyclage des matériaux peut être trouvé à l'issu des produits à durée de vie limitée, comme les canettes en aluminium, basé sur l'innovation et la création de valeur au moyen d'une pensée systémique où le système fonctionne de manière optimale plutôt que sur la recherche de l'efficacité de certains éléments de l'économie au détriment de sa stabilité.

En outre, une part de la recherche sur le thème de l'économie circulaire converge autour de la production et offre des biens et des services et la gestion du déchets. Dans ce contexte, la revue économique, qu'elle soit sous la forme traditionnelle écrite, ou qu'elle soit accessible par internet en apportant des informations, connaît un succès d'audience de certains contenus sur des plateformes de publication ci-dessous.

Tableau 3.1.1.4 Les journaux de l'économie circulaire.

SUJET	***JOURNAL***
Industrial ecology	Journal of Industrial Ecology
Urban metabolism	Journal of Cleaner Production
Clean technology	Resources, Conservation and Recycling
Cleaner production	Environmental Science & Technology
Closed-loop supply chains	American Chemical Society
Recycling	International Journal of Production Research
Reverse logistics	International Journal of Production Economics
Remanufacturing	International Journal of Production Economics
Product service systems	Manufacturing & Service Operations Management

Source : L'auteur

3.1.2 Ecoles de pensée autour de l'économie circulaire

L'économie circulaire tire ses origines de divers courants de pensée. S'étant développé progressivement à partir des années 1970 à l'initiative d'un petit nombre de chercheurs, d'universitaires, le concept a peu à peu trouvé des applications concrètes au sein de quelques entreprises pionnières. Ce développement peut être exposé à travers plusieurs courants de pensée :

Economie régénérative

Aux États-Unis vers la fin des années 1970 John T. Lyle, paysagiste, a développé une théorie autour de la notion de conception régénérative *regenerative design* (Tyle, 1996). Le terme de *régénération* décrit des processus qui visent à restaurer, renouveler ou revitaliser l'énergie et les matières nécessaires à la production – créant les conditions pour l'établissement de systèmes pérennes qui répondent aux besoins de la société, dans le respect de l'intégrité de la nature. Le sujet a continué son développement au « *Lyle centre for regenerative studies* » [29].

Economie de la performance

En 1976, Walter Stahel (Tableau 3.1.2.1), architecte et économiste, a développé dans *The Potential for Substituting Manpower for Energy* , co-écrit avec Geneviève Reday, les principes d'une économie fonctionnant en circuit fermé (ou économie circulaire) et de son impact sur la création d'emplois, la croissance, la prévention des déchets et la consommation de ressources. Fondateur du *Product Life Institute* il y a plus de 25 ans, Walter Stahel oriente ses travaux autour de l'extension de la vie des produits, du reconditionnement et de la prévention des déchets. Il insiste par ailleurs sur l'importance de la vente de services plutôt que des produits, et développe le concept de *functional service economy* (*économie de la fonctionnalité*), aujourd'hui plus largement connu sous le terme d' *économie de la performance* ou d'*économie de l'usage* .

Tableau 3.1.2.1 Auteurs de l'économie circulaire.

Auteurs	Sujet	Niveau
(1862) Peter Lund Simmonds	By-product exchanges	Industrial System
(1966) Kenneth Boulding	The spaceship "closed-economy"	Industrial System
(1969) Robert Ayres & Allen Kneese	Industrial "metabolism"	Industrial System
(1989) Robert Frosch & Nicholas Gallopoulous	Industrial "ecosystem"	Industrial System
(1984) Walter Stahel	Circular or loop economy through product-life extension.	Product Design
(1993) Paul Hawken	Circular economy, restorative economy.	Community
(1996) Thomas Graedel	Earth system ecology.	Industrial System
(1997) Janine Benyus	Biomimicry Design.	Product Design
(1998; 2010) Gunter Pauli	Coined term 'up-cycling' and Blue Economy.	Enterprise Development
(2002; 2007 & 2013) Michael Braungart & William McDonough	Cradle to Cradle Design Framework. Distinction between technical and biological "nutrients".	Product Design

Source : Tennant *et al.* 2015.

[29] On peut trouver plus de renseignement sur le centre en : *https://www.cpp.edu/~crs/history.html.* (site consulté le 13 août 2015).

Cradle to Cradle

Walter Stahel, reconnue pour être à l'origine de l'expression *Cradle to Cradle* ou *Du berceau au berceau* à la fin des années 1970 à travaille sur approche en *cercle fermé* plus qu'un modèle linéaire.

Le principe de *ne plus faire moins mal, mais bien* comme Michael Braungart et William McDonough (Tableau 3.1.2.1), l'indiquent dans leur ouvrage *Cradle to Cradle* publié en 2002 aux Etats-Unis.

La philosophie *Du berceau au berceau* s'appuie sur 4 postulats:

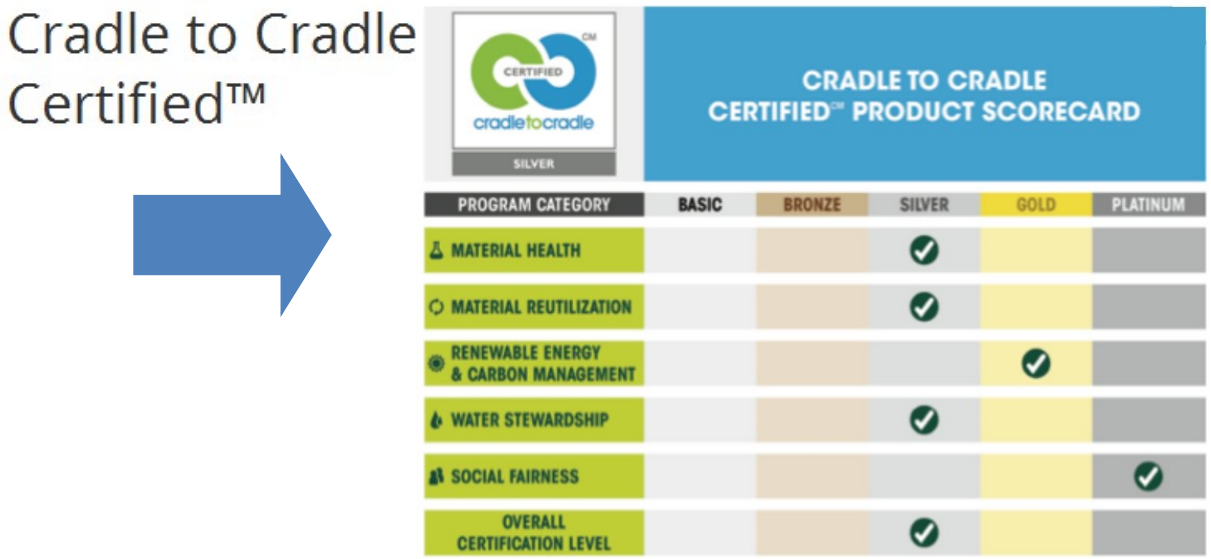
1. Les déchets peuvent être des ressources ;
2. Le soleil est l'énergie renouvelable ultime ;
3. La diversité doit caractériser les produits ;
4. L'intention de ne pas nuire doit être assumée .

En outre, en 2002, Mc Donough et Braungart, créent la certification internationale *Cradle-to-Cradle - C2C* les critères de la certification C2C couvrent la santé (abolition des toxiques), la part de réutilisation, l'utilisation d'énergies renouvelables, la conservation de l'eau et la responsabilité sociale.

Après quelques années, Mc Donough et Braungart se sont remis au travail en 2013 pour livrer le fruit de leur réflexion à la lumière de leur expérience accumulée pendant ces années en écrivant *The Upcycle*. Le livre reprend les principes fondateurs de *Cradle-to-Cradle* et étend le champ d'application au-delà des produits pour imaginer la ville et la société construites selon ces principes dans une approche globale. La proposition est de réinventer notre monde en partant sur des exigences de design claires dans une dynamique d'amélioration continue.

La Fondation Ellen Mac Arthur partage la philosophie *Cradle-to-Cradle*. Cette philosophie apporte aussi des solutions concrètes aux entreprises ou aux institutions qui les sollicitent. Par exemple, en juin 2011, Tarkett, fabricant du sols industriels, obtient sa première certification *Cradle-to-Cradle*.

Figure 3.1.2.2 Cradle to cradle - Certified.



Source : *http://www.c2ccertified.org/* (site consulté le 15 août 2015).

La Fondation Ellen MacArthur a présenté lors du forum de Davos qui se tenait en mai 2016 la deuxième édition de son rapport sur l'impact de l'économie circulaire en Europe (Ellen MacArthur Foundation , 2016). L'étude a permis cette année de mettre en évidence la pertinence économique de l'économie circulaire sur le secteur des biens de consommation courants, qui représente environ 60% de la dépense des ménages. L'étude estime les économies réalisées sur les matières premières par une approche d'économie circulaire à 700 milliards de dollars par an et elle n'inclut pas les externalités positives amenées au passage comme l'emploi local ou la prévention de la dégradation des ressources naturelles.

Finalement, dans notre thèse nous voulons adapter l'indicateur physique qui a été proposé par la Fondation Ellen MacArthur pour mesurer la circularité d'un processus physiques et l'apliquer aussi à la mesure d'un bouclage énergetique.

Écologie Industrielle

L'écologie industrielle est l'étude des flux de matières et d'énergie au cœur des systèmes industriels (on peut trouver plus de renseignement en annexe III.C sur la base de données physique). Elle partage quelques fondements avec l'économie écologique. Opérant sur les échanges entre les différents acteurs d'un écosystème industriel, cette approche favorise des fonctionnements en boucle fermée dans lesquels les déchets des uns constituent les intrants des autres, éliminant ainsi la notion de sous-produit.

L'écologie industrielle adopte un point de vue systémique, où les processus de production sont conçus dès le départ en fonction des contraintes écologiques locales, tout en prenant en compte leur impact global, et de manière à ce qu'ils fonctionnent à l'image des systèmes vivants. Ces principes peuvent également s'étendre au secteur des services. Veillant à la restauration du capital naturel, l'écologie industrielle s'attache au développement du bien-être social.

Biomimétisme

Le modèle circulaire repose aussi sur une approche biomimétique, en considérant que nos systèmes devraient fonctionner comme des organismes vivants qui synthétisent des nutriments qui à leur tour nourrissent le cycle. Il se compose de quelques principes fondateurs, dans lesquels la nature ne connaît pas le concept du déchet. Chaque élément biologique, chimique ou physique (appelé nutriment) qui entre dans la composition de n'importe quel produit doit être conçu dans la perspective de son désassemblage et de sa réutilisation. Les systèmes complexes dotés de connexions et de strates multiples sont plus résistants aux chocs extérieurs que les systèmes conçus pour leur seule efficacité. À l'image de tout organisme vivant, chaque système devrait tendre à fonctionner à partir d'énergie naturelle et renouvelable. Les prix doivent refléter le véritable coût de nos activités afin d'utiliser les ressources de manière rationnelle.

Janine Benyus (Tableau 3.1.2.1), auteure de B*iomimicry: Innovation Inspired by Nature*, définit le biomimétisme comme "*une nouvelle discipline qui étudie les meilleures idées de la nature s'inspire de ses techniques et procédés pour résoudre des problèmes humaines*". L'étude d'une feuille végétale pour créer une cellule photovoltaïque plus efficace en offre un exemple parlant.

J. Benyus définit ce principe comme une innovation inspirée de la nature, et qui repose sur trois principes fondamentaux :

1. La nature comme modèle : étudier la nature pour ses formes, ses processus, ses systèmes et stratégies, afin résoudre les problèmes humaines.

2. La nature comme mesure : utiliser une norme écologique pour en évaluer la viabilité de nos innovations.

3. La nature comme mentor : envisager la nature non pas en fonction de ce que l'on peut en retirer, mais en fonction de ce que nous pouvons en apprendre.

Economie Bleue

Initiée par l'ancien PDG d'Ecover et homme d'affaires belge Gunter Pauli (Tableau 3.1.2.1), l'Économie Bleue est un mouvement open-source, réunissant des études de cas, dans un premier temps compilées dans un rapport éponyme remis au Club de Rome. Comme le spécifie son manifeste : "*utilisant les ressources disponibles dans des systèmes en cascade (…) les déchets d'un produit deviennent des intrants pour créer une nouvelle source de profit*". Basée sur 21 principes fondateurs, l'Économie Bleue établit que les solutions sont déterminées par l'environnement local et ses caractéristiques physiques / écologiques et préconise le principe de la gravité comme source d'énergie primaire. Le rapport prévoit la réalisation de 100 innovations susceptibles de créer 100 millions d'emplois, d'ici 10 ans et fournit de nombreux exemples de projets de collaboratifs Sud-Sud.

3.1.3 Application de l'économie circulaire à l'Europe

La Commission a adopté aujourd'hui des propositions pour convertir l'Europe à une économie plus circulaire et promouvoir le recyclage dans les États membres. Le projet s'inscrit dans une démarche ambitieuse de transition fondamentale entre un modèle économique linéaire et une économie plus circulaire en utilisant le cadre qui a été proposé pour l'écologie industrielle déjà evoquée dans les sections 3.1.1 et 3.1.2 de la thèse., Elles appellent donc les Européens à recycler 70 % des déchets municipaux et 80 % des déchets d'emballages d'ici à 2030[30].

[30]Pour développement détaillé sur les donnes du recyclage en Europe, consulter le site: *europa.eu/rapid/press-release_IP-14-763_fr.htm* (site consulté le 20 août 2015).

La démarche ZERO WASTE

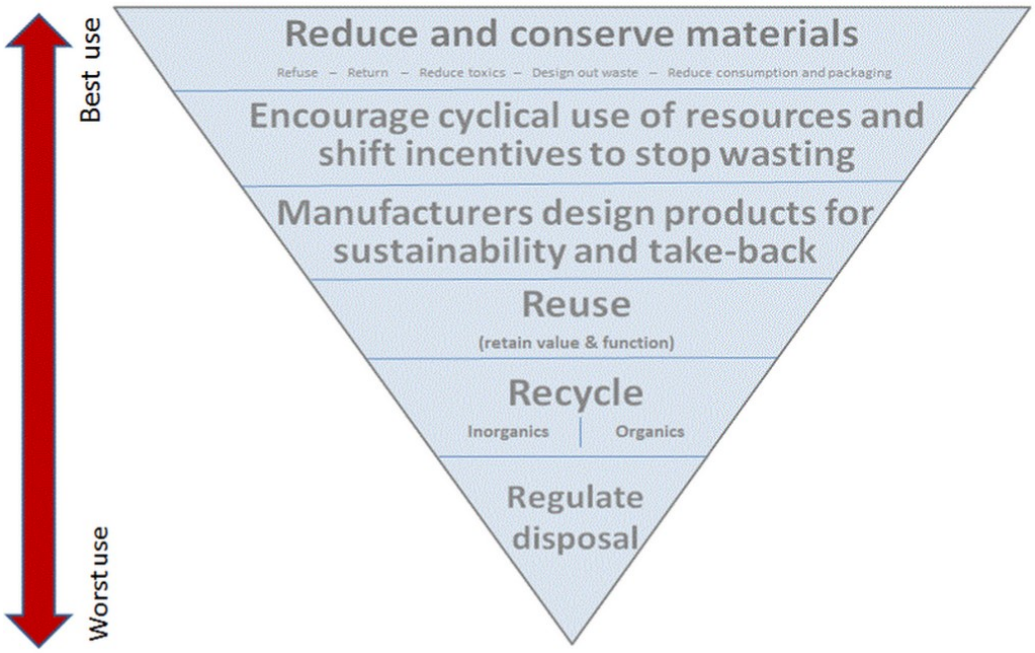
En effet, la Commission européenne souligne les défis de recycler et réutiliser. Pour cet objectif, les mairies des villes européennes ont utilisé le système SWOT[31] (cf. l'annexe III.D) pour analyser les déchets dans le cadre de l'initiative *Low Cost Zero Waste,* projet cofinancé par le fond européen de développement régional. L'objectif était de fournir aux autorités locales une démarche durable pour la gestion des déchets solides. Le principe du classement est le suivant (Zero waste project, 2015):

1. La collecte séparée des déchets d'emballages et des documents imprimés ;
2. La réutilisation d'électroménager ;
3. Le compostage au ménage ;
4. Le compostage déchets vert public ;
5. La séparation des déchets verts collectés séparément au centre de recyclage ;
6. L'application des régimes de tarification équitable (PAYT) ;
7. La collecte sélective et recyclage des déchets électriques et électroniques (WEEE) ;
8. La collecte et gestion environnementale des déchets domestiques dangereux ;
9. La collecte sélective et réutilisation / recyclage des déchets encombrants ;
10. La collecte sélective et réutilisation de textile / habillement ;
11. La gestion durable de cycle de vie des véhicules (ELVS) ;
12. La gestion durable des déchets de la construction ;
13. La gestion durable des huiles de friture usagées .

En outre, l'*Alliance européenne ZeroWaste* cherche à maximiser l'usage en réutilisant, partageant, mutualisant l'accès à des biens, voir figure 3.1.4.1.

[31] Le terme SWOT est un acronyme de : *Strengths* (forces), *Weaknesses* (faiblesses), *Opportunities* (opportunités), *Threats* (menaces).

Figure 3.1.4.1: La hiérarchie des usages de Zero Waste.



Source : Zerowasteeurope[32], 2015

Cette hiérarchie des usages de *Zero waste* a été appliquée à plusieurs villes d'Europe comme les villes italiennes de Capannori et Contarina, la ville catalane d'Argentona en Espagne, les villes de Vrhnika et Ljubljana en Slovénie et le territoire de Gipuzkoa au Pays basque espagnol.

Suite à cette expérience, la ville de Capannori a représenté un exemple emblématique de la démarche *Zero waste* en Europe.

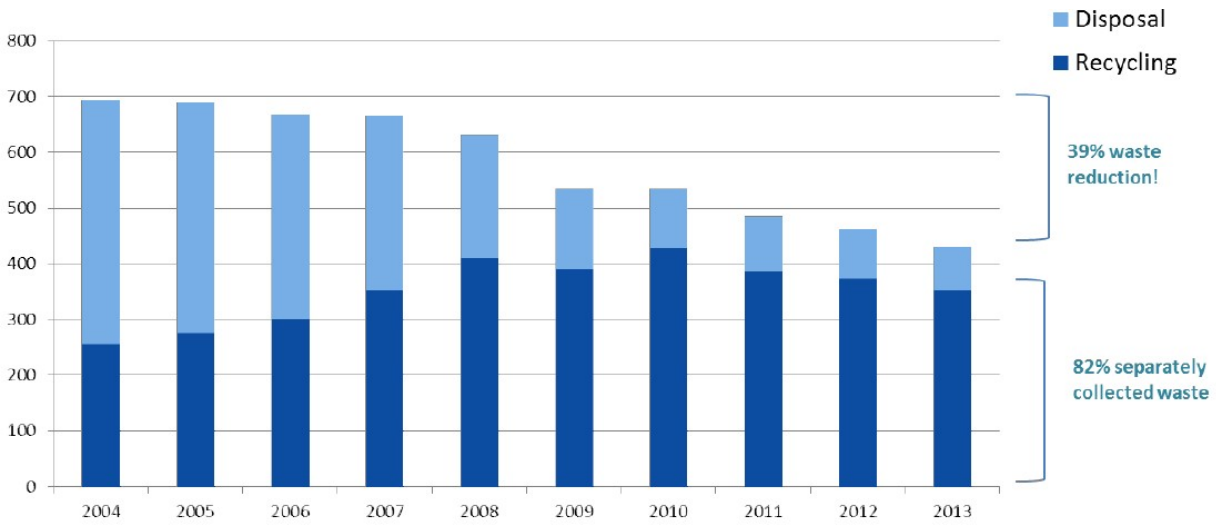
La ville italienne de Capannori.

La commune toscane de Capannori (46 000 habitants) est la première ville d'Europe à s'être fixé un objectif de production de zéro déchet d'ici à 2020. Depuis 6 ans, et le début de cet engagement, la communauté de Capannori, environ 46.000 habitants, a réduit de 30% sa production annuelle du déchets. Elle recycle 82% des déchets de ses habitants (Source : Van Vliet, 2014).

En outre, le modèle nord-européen de recours à l'incinération pour éviter les problèmes environnementaux est mis en question. En 1997, Rossano Ercoloni, instituteur de métier et sensible aux options écologiques, prend conscience des effets potentiellement dommageables de l'incinérateur en projet, sur la santé des habitants et sur la nature. Face à ce problème, Ercolini jugea que la seule approche valide passe par la réduction des déchets. Il parvient ensuite à convaincre le conseil municipal de Capannori d'adopter la stratégie *Zerowaste*. La collecte sélective est mise en place progressivement entre 2005 à 2010 sur le territoire de la commune, voir graphique 3.1.4.2.

[32]Pour développement détaillé sur la démarche *Zerowaste*, consulter le site: *http://www.zerowasteeurope.eu/* (site consulté le 20 août 2015).

Graphique 3.1.4.2 La collecte sélective à Capannori.



Source : Van Vliet, 2014.

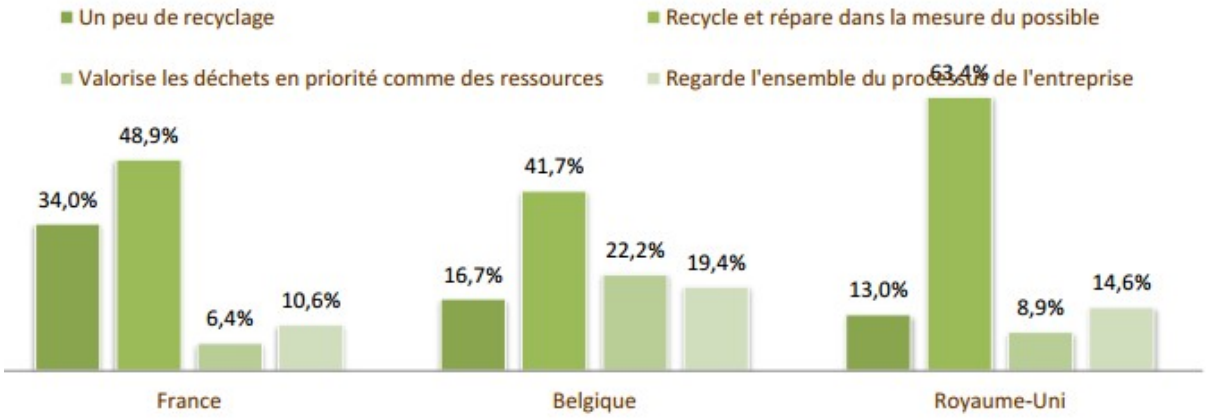
Apres cet brève présentation de la démarche européenne d'économie circulaire, nous nous concentrerons sur les secteurs les plus importants.

Les secteurs prioritaires pour une économie circulaire au niveau européen.

Basés sur l'étude de la Commission européenne (IEEP, 2014), les secteurs de l'emballage, de l'industrie agro-alimentaire, des équipements électriques et électroniques, du transport, de l'ameublement sont identifiés comme des priorités dans ce rapport (cf. annexe III.A).

Au niveau des entreprises, le projet *FUSION* a analysé au total 52 entreprises françaises, 35 entreprises belges et 144 entreprises anglaises dans les trois pays interrogés, qui ont répondu mettre systématiquement en œuvre des démarches de recyclage et de réemploi (voir graphique 3.1.4.3).

Graphique 3.1.4.3: Démarche d'économie circulaire dans les entreprises des trois pays.



Source: Projet *FUSION*, 2013

Citons quelques passages des résultats de l'enquête du Projet *FUSION* [33], notamment les conclusions suvantes :

> *" Les trois secteurs clés à même de tirer profit d'une démarche d'économie circulaire sont l'industrie, le bâtiment et la gestion des déchets/recyclage.*
>
> *Les emballages et les déchets électroniques offrent les meilleures opportunités d'un point de vue de démarches d'économie circulaire.*
>
> *Les barrières à la mise en œuvre d'une démarche d'économie circulaire au sein de l'entreprise sont : manque de temps, 20.8% ; mettre en œuvre les principes au sein de l'entreprise, 14.2% ; la réglementation, 12.4% ; une demande clients absente, 11.1%, et enfin identifier des opportunités de collaboration, 10.1%.*
>
> *Les entreprises souhaitent percevoir les bénéfices économiques de l'économie circulaire, mais aussi que cela leur soit démontré.*
>
> *Les outils pratiques qui pourraient faciliter la mise en œuvre de l'économie circulaire sont : Se débarrasser du jargon, être accompagné par des experts, obtenir le soutien des entreprises du déchet, disposer de fiches pratiques sur le réemploi et le recyclage ".*

Sans surprise, le dernier rapport de l'ADEME (un point que nous traiterons dans la page suivante de manière plus détaillée), réalisé par Régis BIGOT et Sandra HOIBIAN en 2014, montre la même tendance que l'enquête du projet *FUSION*, donc, une plus grande attention portée aux emballages et au souhait d'allonger la durée de vie des objets.

[33] Pour plus d'informations concernant l'Observatoire FUSION et les résultats, consulter le site: *http://www.cd2e.com/nos-projets/interreg-fusion-economie-circulaire* (site consulté le 20 août 2015).

Les enquêtes pour une économie circulaire au niveau européen.

La logique actuelle de notre économie est principalement fondée sur un modèle linéaire de consommation de ressources naturelles, puisant dans un stock limité de matériaux et générant des déchets. Avec l'économie circulaire, les déchets redeviennent des matériaux, à condition qu'ils aient été conçus dès le départ sans nuisances pour l'environnement et soient réutilisables pour l'industrie.

Nous voulons montrer des enquêtes pour mesurer les opportunités d'une économie circulaire du côté biophysique. Dans ce sens, nous avons trouvé plusieurs enquêtes déjà réalisées en France, lesquelles nous présenteront en bref:

1. Projet Interreg FUSION: Les 7 partenaires issus de 4 régions transfrontalières différentes (Royaume-Uni, Les Pays-Bas, la Flandre et la France) travaillent ensemble pour imaginer de nouvelles méthodes et de nouveaux critères d'analyses pour accompagner des entreprises. Au total, 52 entreprises françaises, 35 entreprises belges et 144 entreprises anglaises ont répondu à cette enquête dédiée à l'économie circulaire et la gestion optimale des ressources (Cd2e, 2014).

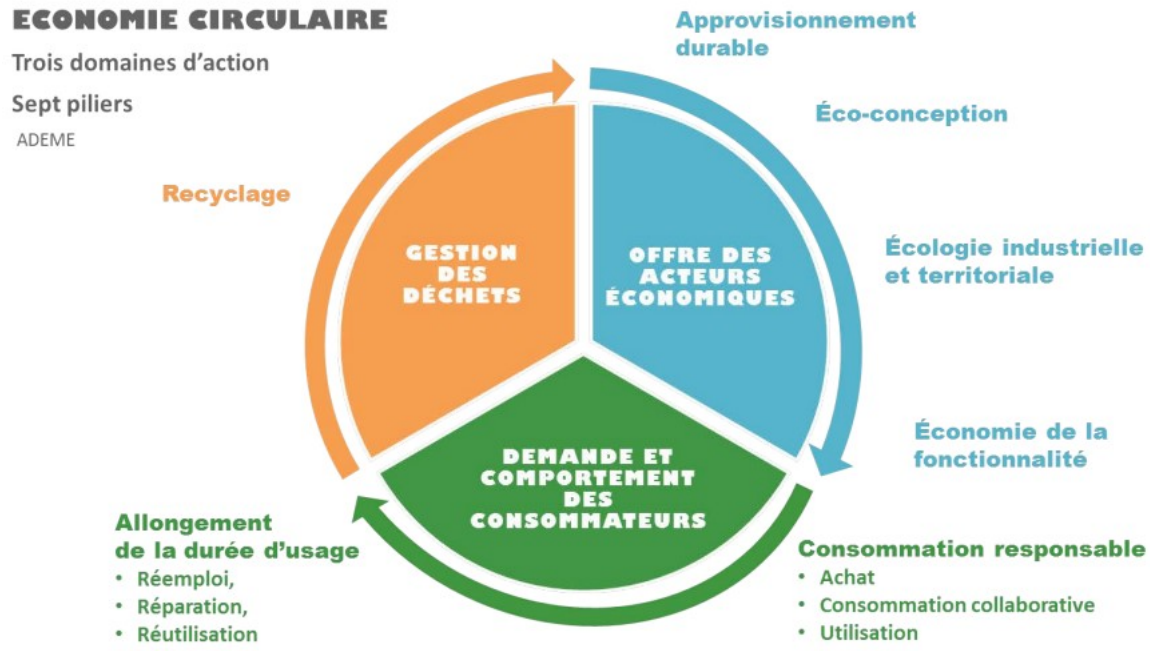
2. Projet VALORMAT : Le Projet VALORMAT, financé par l'ADEME dans le cadre du programme économie circulaire des Investissements d'Avenir. Ce projet vise à la création d'une filière de recyclage des mousses polyuréthanes et des textiles issus de la literie en fin de vie (ADEME, 2014d).

3. Enquête en ligne à l'Université de Lorraine: entreprises, et si vous vous mettiez à l'économie circulaire ? (voir l'annexe III.B).

3.2 L'économie circulaire en France : *Quoi et Comment ?*

Apres cet introduction de la vision industriel de l'économie circulaire, cette partie traite des questions sur le fonctionnement et l'articulation du sujet en France autour de 7 principes clés selon la définition propose pour l'ADEME (ADEME, 2014b).

Figure 3.2.1 : Les 7 piliers de l'économie circulaire.



Source : ADEME, 2014b

1. L'*APPROVISIONEMENT DURABLE* : le mode d'extraction des ressources nécessaires pour la production peut être pris en compte et l'impact sur l'environnement limité en modifiant par exemple :

- La source d'approvisionnement ;
- Le lieu d'approvisionnement ;
- Le mode d'extraction ;
- Le mode de compensation de dégâts engendrés à l'environnement .

2. L'*ÉCOCONCEPTION* pour minimiser les impacts environnementaux dès l'élaboration d'un produit. L'exemple d'écoconception du quartier d'Hammarby, au sud du centre-ville de Stockholm, témoigne de la création de valeur par la réhabilitation de l'existant, dans le but de le rendre plus efficace et plus sobre en énergie. [34]

La restitution de la table ronde sur l'économie circulaire réalisée le 20 et 21 de septembre 2013 à Paris propose les orientations suivantes sur l'écoconception :

> " *L'importance de mieux informer le consommateur des critères de matières recyclées, de durée d'usage et de garantie, et donc la nécessité de renforcer ces critères dans les écolabels, étiquetages et écocertifications existants, en accompagnant les petites et moyennes entreprises. Il a été demandé que les collectivités et l'État, notamment dans le cadre de la démarche d'achats exemplaires, veillent à ce que les critères de décision favorisent la durée de vie, l'incorporation de matières recyclées, le réemploi et la recyclabilité. En parallèle, il a été retenu le principe d'une mobilisation par les industriels de chaque filière de renforcer et diffuser les bonnes pratiques d'économie circulaire à l'échelle de leur secteur, et de se fixer des objectifs vis-à-vis de ces critères, notamment d'incorporation de matières recyclées, adaptés à chaque secteur de manière différenciée*" (Orru, 2013).

3. L'*ÉCOLOGIE INDUSTRIELLE*, organisation qui optimise l'usage de la ressource (matière et énergie).(Cf. partie. 3.1.2).

4. L'*ÉCONOMIE DE FONCTIONNALITÉ* qui privilégie l'usage à la possession.

5. La *CONSOMMATION RESPONSABLE* est l'expression d'un consommateur averti, responsable et engagé. [35]

6. L'*ALLONGEMENT DE LA DURÉE D'USAGE* conduit :

- au *RÉEMPLOI,* permettant de remettre dans le circuit économique les produits ne répondant plus aux besoins du premier consommateur. Par exemple, la vente de pneus d'occasion.

- à la *RÉPARATION* : les biens en panne peuvent retrouver une deuxième vie par le biais de la réparation.

- à la *RÉUTILISATION* : certains composants d'un produit peuvent être réparés ou démontés et les pièces encore en état de fonctionnement triées puis revendues.

7. Le *RECYCLAGE* qui vise à réutiliser les matières premières issues des déchets, en boucle fermée (produits similaires) ou en boucle ouverte (utilisation dans d'autres types de biens).

Si le recyclage est le phénomène le plus visible, il ne faut pas oublier qu'il s'effectue en aval de la production et de la consommation, et qu'il est possible d'intégrer l'économie circulaire dès le début du processus.

---

[34] Pour développement détaillé sur la écoconception en Stockholm, consulter le site: *http://www.lafabriquedelacite.com/fabrique-de-la_cite/site/fr/focus/pages/l_economie_circulaire_un_nouveau_modele_de_creation_de_valeur.htm* (site consulté le 22 août 2015).

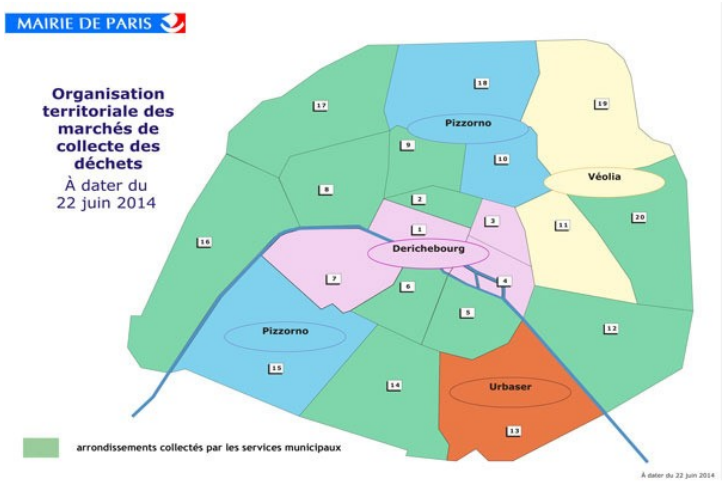
[35]Pour développement détaillé sur la consommation responsable, consulter le site : *http://www.vedura.fr/economie/consommation-responsable* (site consulté le 22 août 2015).

3.2.1 *Quoi ?* : Définitions et typologies des déchets à Paris

L'Île-de-France est un territoire en évolution présentant une cohérence géographique et économique. Il comprend 8 départements [36]. C'est un territoire vaste, dans lequel les centres administratifs et décisionnels sont multiples et se superposent à plusieurs échelles, qui concentre un certain nombre d'enjeux stratégiques. Paris, situé au cœur du territoire, constitue un pôle économique majeur, centre d'emplois et de convergence de nombreux flux.

Chaque jour, 3000 tonnes du déchets sont collectées sous la responsabilité de la Mairie de Paris[37]. La Ville a pour obligation de collecter les déchets des ménages.

Figure 3.2.1.1: L'organisation territoriale de la collecte d'ordures ménagères à Paris.



Source : Marie de Paris[38]

Le dynamisme économique du territoire induit la nécessité d'une approche durable du développement. A la lumière de ce dynamisme économique du territoire, des opportunités pour introduire l'économie circulaire apparaissent dans cinq filières spécifiques :

1. *Filière des déchets du BTP*

Paris est un territoire où circule une grande quantité de flux de matériaux du BTP, au vu du nombre de chantiers en projet et en cours. Ainsi, en partant du constat que le secteur du BTP, en France, représente 30 % de la production totale du déchets en moyenne, et que le territoire parisien est fortement concerné par les transformations liées à son dynamisme économique, à la rénovation urbaine et au futur

[36] Il-de- France comprend 8 département : Paris (75), Seine-et-Marne (77), Yvelines (78), Essonne (91),Hauts-de-Seine (92),Seine-Saint-Denis (93),Val-de-Marne (94) et Val-d'Oise (95).

[37] Pour plus d'informations concernant au déchets collectées sous la responsabilité de la Mairie de Paris, consulter le site: *http://www.paris.fr/services-et-infos-pratiques/environnement-et-espaces-verts/dechets/la-collecte-44* (site consulté le 24 août 2015).

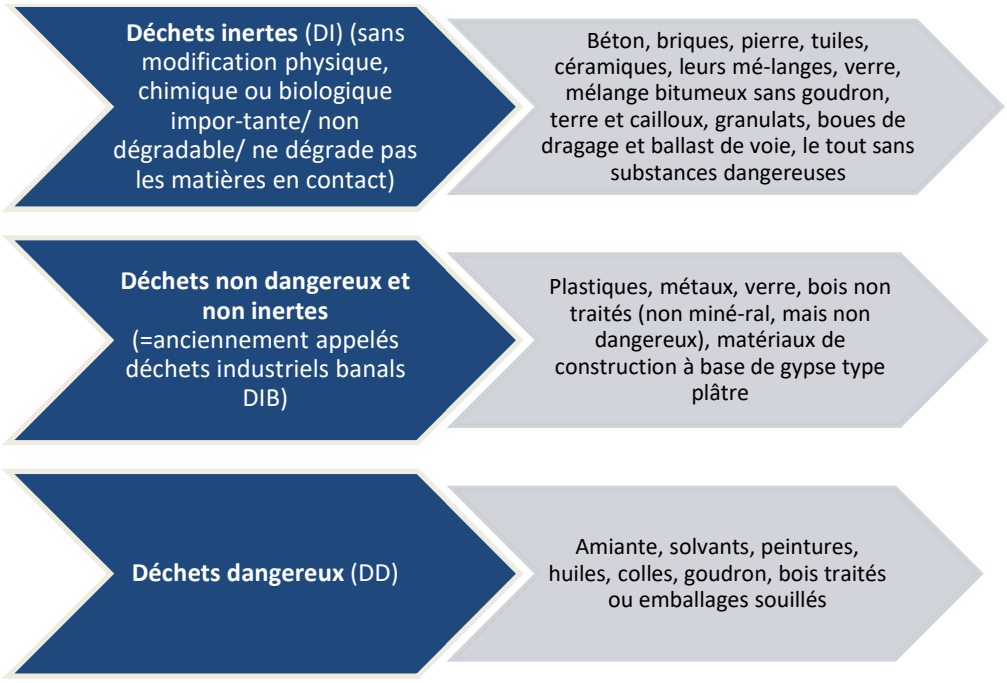
[38] Idem

réseau du Grand ParisExpress, il est important de saisir les enjeux de la gestion des déchets issus de ce secteur.

Définition et typologie des déchets du BTP

Les déchets du BTP se décomposent en trois catégories selon la législation[39] résumée dans le tableau suivant :

Figure 3.2.1.2 : Les types du déchet du BTP et les exemples.



Source : L'auteur à partir d'ADEME, 2012

La hiérarchie des modes de traitement

Le code de l'environnement définit la hiérarchie des modes de traitement dans l'ordre suivant:

- La préparation en vue de la réutilisation ;

- Le recyclage ;

- Toute autre valorisation, notamment la valorisation énergétique ;

- L'élimination .

[39] Définition : L'article R. 541-8 du code de l'environnement (Décret n° 2011-828 du 11 juillet 2011, article 8 I)

État de lieux des pratiques et principaux enjeux du secteur

Selon L'ADEME, une attention particulière doit être accordée au secteur du BTP. En effet, le secteur se caractérise par " *une très grande diversité dans la taille, dans la concentration et dans la fréquence des chantiers et donc dans la production des déchets dans le temps et dans l'espace, qui nécessite une organisation de la collecte adaptée à la fluctuation de la production ainsi que des structures de regroupement et de tri* ".[40]

En outre, plusieurs tendances induisent la nécessité d'agir pour circulariser les flux du secteur du BTP mais aussi constituent des barrières à la circularisation. La plus importante d'entre elles est la raréfaction des matériaux naturels de construction (granulats, sables, gypse). Ces matériaux dits *nobles* sont peu chers dans le BTP, ce qui constitue une barrière à l'utilisation de matériaux recyclés mais leur raréfaction en Île-de-France tend à faire monter les prix et poser de nouvelles difficultés d'approvisionnement.

Flux dans le secteur du BTP à Paris et pistes de valorisation

Dans le secteur du bâtiment, la FFB (Fédération française du Bâtiment) et l'ADEME ont estimé la répartition des déchets au niveau national. Le gisement est constitué d'environ 72,4% du déchets inertes, 26% du déchets non dangereux et 1,5% du déchets dangereux. De plus, 7% proviendrait de la construction neuve, 28% de la réhabilitation et 65% de la démolition (ADEME , 2010c).

Également, la moyenne annuelle des mises en chantier par 10000 habitants sur le territoire de 2001 à 2010 était d'environ 1500, soit plus de dix fois supérieures à celle de Paris et sa petite couronne. [41]

2. Filière des biodéchets

Paris concentre un grand nombre d'activités productrices de biodéchets de différents types. L'intérêt pour les flux de biodéchets est voué à s'accroitre sur le territoire du fait de l'application de la règlementation sur le tri et le traitement des biodéchets, et du constat de la non-circularité des flux actuels.

[40] Pour développement détaillé sur la ADEME, consulter le site : *www.ademe.fr* (site consulté le 25 août 2015).

[41] Les donnés sur le BTP (Bâtiment et travail public) à Paris peut être trouves dans l'ouvrage du FFB ADEME, *Mieux gérer les déchets de chantiers de bâtiment* de 2010, consulter le site : *http://www.ffbatiment.fr/Files/pub/Fede_N00/FFB_PUBLICATION_3349/282cdf9f-3298-4e1b-9065-0bd54a998f5e/PJ/gerer-dechets-chantier.pdf* (site consulté le 25 août 2015).

Définition et typologie des déchets du biodéchets

La notion de *biodéchet* est définie par la législation (l'article R. 541-8 du code de l'environnement) [42]:

> " *Tout déchet non dangereux biodégradable de jardin ou de parc, tout déchet non dangereux alimentaire ou de cuisine issu notamment des ménages, des restaurants, des traiteurs ou des magasins de vente au détail, ainsi que tout déchet comparable provenant des établissements de production ou de transformation de denrées alimentaires* " (MEDDE, 2012).

Le biodéchet comprend également des matières organiques biodégradables qui proviennent principalement de la restauration, des Industries Agro-Alimentaires (IAA), de l'agriculture, de l'élevage, et des déchets des ménages.

Une typologie des biodéchets est exposée ci-dessous et précise ceux qui sont concernés par l'obligation de tri et de valorisation, ainsi que ceux qui ne le sont pas.

Figure 3.2.1.3: Typologie des biodéchets.

Liste des biodéchets concernés et non concernés par l'obligation de valorisation organique.

	Biodéchets concernés	Biodéchets non concernés
Déchets de parcs et de jardins	– Tontes de gazon, taille des haies, feuilles mortes, herbes coupées	– Gros déchets de taille et d'élagage, destinés à la valorisation énergétique
Déchets alimentaires Déchets de cuisine	– Tous les déchets d'origine végétale (épluchures de légumes, restes de fruits, farines, ...)	
	– Déchets d'origine animale : SPA (Sous-Produits animaux) de catégorie 3	– SPA (Sous-Produits animaux) de catégories 1 et 2
Biodéchets liquides	– Huiles alimentaires	– Sauces, boissons

Autres déchets organiques non concernés par l'obligation de valorisation organique.

Autres déchets organiques non concernés
– Boues d'épuration, – Déchets de bacs à graisse – Déchets de la transformation du bois – Déchets d'animalerie, – Déchets d'abattoirs – Déchets de l'agriculture, de la sylviculture et de la pêche

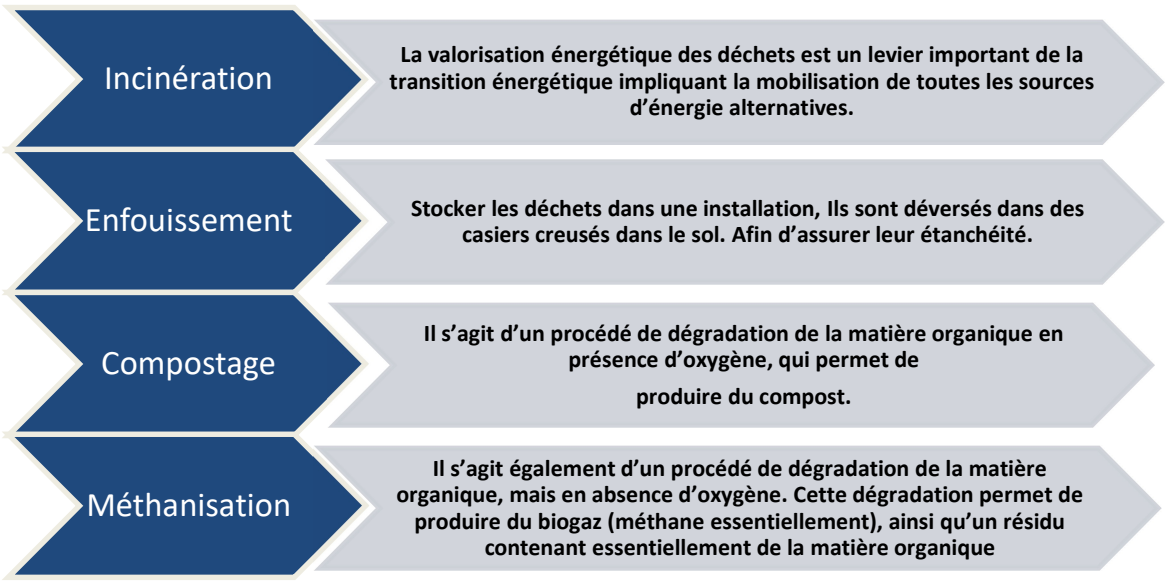
Source : ADEME, 2013b

[42] Pour développement détaillé sur le biodéchet, consulter le site: *http://circulaire.legifrance.gouv.fr/pdf/2012/01/cir_34512.pdf* (site consulté le 26 août 2015).

Types de traitement des biodéchets

Aujourd'hui, l'incinération et l'enfouissement sont les principaux modes de traitement des biodéchets. Cependant, les deux modes de traitement qui représentent le plus grand potentiel en termes d'écologie industrielle sont le compostage et la méthanisation.

Figure 3.2.1.4: Typologie de traitement des biodéchets.



Source : L'auteur avec ADEME, 2013b [43] [44]

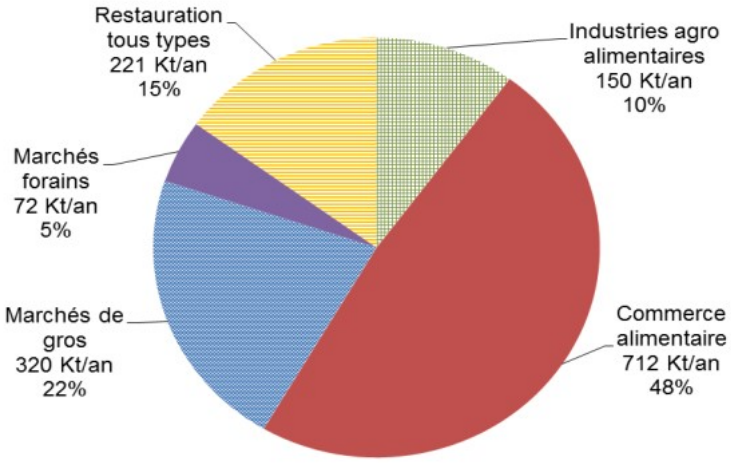
Principaux enjeux du secteur

Selon l'ADEME, en France les principales activités productrices du déchets alimentaires génèrent, un total de 1 475 Kt/an du déchets (ADEME, 2013a). Elles peuvent être montrées dans la figure 3.2.1.5 :

[43] Pour l'incinération consulter le site : *http://www.ademe.fr/expertises/dechets/passer-a-laction/valorisation-energetique/dossier/lincineration/lessentiel-lincineration* (site consulté le 27 août 2015).

[44] Pour l'enfouissement consulter le site : *http://www.observatoiredesdechets76.net/lenfouissement/* (site consulté le 27 août 2015).

Figure 3.2.1.5: La répartition des gisements de biodéchets selon les secteurs d'activités.



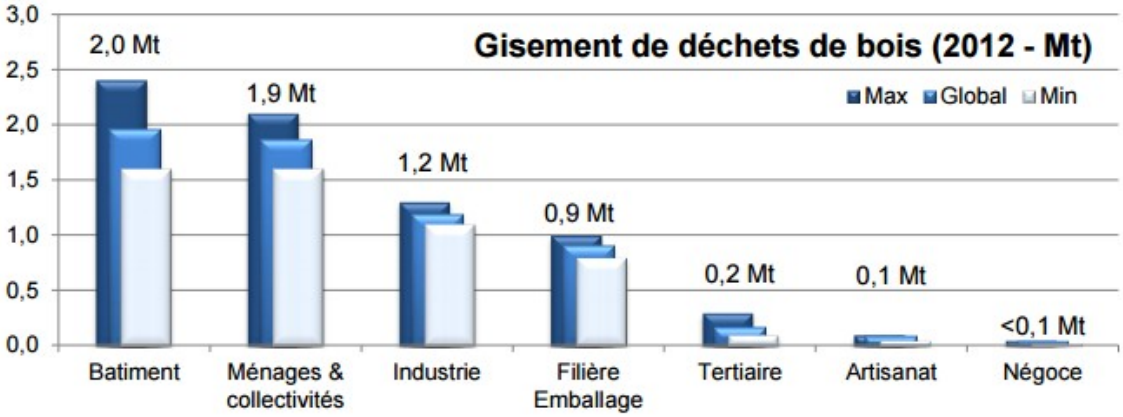
Source : ADEME, 2013b

Dans notre thèse nous analyserons le compostage des ordures ménagères qui presente une certaine complexité d'interaction entre acteurs publics, privés, et la société civile.

3. Filière des déchets de bois et meubles

Le recyclage des déchets de bois et la réutilisation des meubles sont devenus des problématiques récurrentes pour certaines entreprises du territoire. La production du déchets de bois (hors contextes de sciage) atteint en 2012 près de 7,2 millions de tonnes (Mt), les deux principaux secteurs producteurs pour 2 Mt et 1,9 Mt de ces déchets sont respectivement le bâtiment et les ménages et collectivités. L'industrie représente la troisième des apports (ADEME, 2015) voir la figure ci-dessous.

Figure 3.2.1.6: La répartition des gisements de bois en 2012.



Source : ADEME, 2015

Définition et typologie des déchets et valorisation de bois et meubles

La filière bois produit des déchets comme les déchets de l'exploitation forestière, les déchets de scierie de première transformation du bois, les produits des industries de la seconde transformation et les produits provenant des objets usagés. La loi proposée une typologie des déchets de bois en annexe II de l'article R.541-8 du code de l'environnement (on peut trouver plus de renseignement en annexe III.E).

Afin de limiter la production du déchets et d'optimiser leur valorisation, un certain nombre d'actions peuvent être menées au sein de l'entreprise. Tous les sous-produits de la filière bois sont techniquement valorisables, mais les sous-produits en mélange peuvent constituer un obstacle à la valorisation.

En outre, la région de Picardie propose plusieurs types de valorisation matière :

> *" Fabrication de pâte à papier avec les plaquettes et délignures de bois résineux ainsi que les plaquettes de bois feuillus. Fabrication de panneaux de particules, de produits composites, qui constituent un réel débouché pour les produits connexes du bois. Fabrication de compost à partir d'écorces ou autres sous-produits broyés. Utilisation des écorces pour le paillage des espaces verts et des plantations. Utilisation des sciures et copeaux pour les litières animales. Utilisation de plaquettes en remplacement de la paille (dans les haras). Fabrication de charbon de bois "*[45].

Les acteurs du système du déchets du bois et la réglementation

Tout d'abord, selon ADEME, les acteurs du *système déchets du bois* peuvent être groupés en trois catégories (ADEME, 2015) :

- Les producteurs du déchets du bois : industrie et artisanat, entreprises du bâtiment, ménage et collectivité, distribution, tertiaire ;

- Les gestionnaires du déchets du bois : déchèteries, reconditionneurs de palettes, centres de tri et de regroupement ;

- Les utilisateurs et exutoires des déchets du bois : acteurs du réemploi et de la réutilisation, fabricants de panneaux, autres recycleurs, producteurs d'énergie (chaudières collectives et chaudières industrielles), centres de stockage et usines d'incinération d'ordures ménagères.

Selon un rapport de la réglementation européenne sur la valorisation des déchets de bois et des cendres de bois réalisé pour l'ADEME en 2007 :

> *" La réglementation des déchets du bois s'articule aujourd'hui autour de la législation des Installations Classées pour la Protection de l'Environnement, et reste floue quant à la valorisation énergétique du déchets de bois, notamment par rapport aux bois faiblement adjuvants. Des guides techniques de bonnes pratiques et proposition de cahiers des charges servent aujourd'hui de référence en l'absence de précisions réglementaires"* (ADEME, 2007b).

[45] Pour développement détaillé sur une typologie des déchets de bois et meubles, consulter le site: *http://www.dechets.picardie.fr/spip.php?rubrique67* (site consulté le 28 août 2015).

4. Filière des déchets textiles

Définition, typologie et modes de traittement des déchets textiles

D'un point de vue réglementaire, on distingue 2 classes du déchets textiles : d'abord, les déchets *neufs* produits par l'industrie du textile et de l'habillement, mais aussi l'industrie automobile, à chaque étape (fabrication, filature, tissage, apprêts, coupe). Deuxièmement, les textiles usagés ou vieux chiffons, provenant principalement des ménages et des industries.

La filière SITA du groupe SUEZ ENVIRONNEMENT SITA proposé trois systèmes de valorisation[46] :

- Le réemploi ou *l'up-cycling* : Les pièces de tissus nobles sont réutilisées notamment via des boutiques de fripes et des associations caritatives ;

- La valorisation matière : Les textiles peuvent être valorisés sous forme de chiffons destinés au nettoyage ou, après effilochage, comme fibres pour la fabrication de matières isolantes ;

- La valorisation énergétique : Les TLC (textiles, ligne de maison et chaussures) ne pouvant être orientés vers les 2 filières précédentes sont valorisés en CSR ou en produits absorbants pour la co-incinération en cimenteries.

La réglementation et l'organisation entre les acteurs

Selon un rapport de la réglementation européenne sur la valorisation des déchets textiles réalisé pour l'association cercle recyclage :

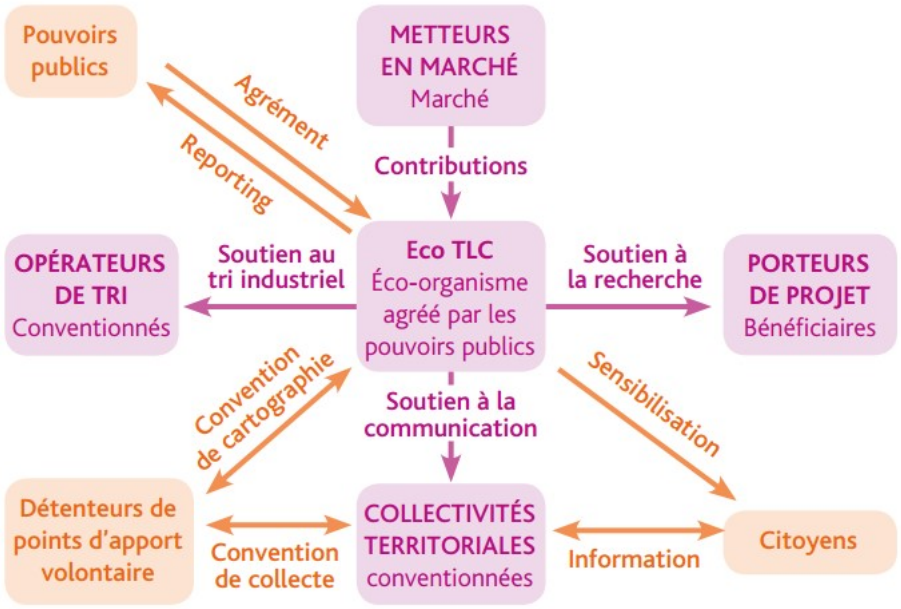
> *" Les modalités d'élimination des déchets textiles issus des ménages sont déterminées dans la loi du 15 juillet 1975, modifiée par la loi du 13 juillet 1992, relative à l'élimination des déchets et à la récupération des matériaux. L'élimination des déchets textiles ne peut être réalisée que dans des Installations Classées pour la Protection de l'Environnement (cf. Code de l'environnement, Livre V, Titre 1er relatif aux installations classées pour la protection de l'environnement) ".* [47]

Selon ADEME, les acteurs du dispositif pour les TLC des ménages peuvent être groupés en huit catégories (ADEME, 2013a), voir la figure 3.2.17.

[46] Pour développement plus complété sur le recyclage de textiles, consulter le site: *http://www.sita.fr/textiles/* (site consulté le 29 août 2015).

[47] La organisations des acteurs dans le recyclage du textile peut être consulté en : *http://www.cercle-recyclage.asso.fr/publi/vade/chap4/fiche39.htm* (site consulté le 29 août 2015).

Figure 3.2.1.7: Les relations entre les acteurs : dispositif pour les TLC des ménages.



Source : ADEME, 2014b

5. Filière des déchets issus des liquides de dégivrage

Définition et typologie des déchets issus des liquides de dégivrage

Selon un rapport du SIVOM de la Région de Cluses sur la gestion des effluents et des déchets industriels (SIVOM, 2012) :

> *“ Un effluent est un rejet d'eaux usées. Il peut être industriel ou ménager. Un effluent ménager est un rejet d'eaux usées assimilable à un usage domestique. Il comprend généralement, les eaux sanitaires, les eaux de consommation et les eaux de lavage des sols de bureau. Un effluent industriel est un rejet d'eaux usées provenant des procès de fabrication et de production ou de nettoyage des ateliers de production ”* (SIVOM, 2012).

Les déchets liquides que l'on peut rencontrer sont notamment les suivants[48] :

1. Hydrocarbures ;
2. Solvants organiques ou chlorés ;
3. Huiles (huiles entières / huiles solubles) ;
4. Peinture et boues de peinture ;
5. Liquides frigorigènes ;

[48]Pour développement détaillé sur les rejet d'eaux usées, consulter le site: *http://www.entreprises.cci-paris-idf.fr/web/environnement/eau/gerer-eau-metier/dechets-liquides-mecanique* (site consulté le 29 août 2015).

6. Eaux de lavage des sols ;
7. Bains et produits chimiques usagés issus du ressuage, du dégraissage ;
8. Eaux de rinçage.

La hiérarchie des modes de traitement

Tout d'abord, le rapport du SIVOM de la Région de Cluses propose 3 types de traitement pour les effluents domestiques, les effluents industriels et les eaux pluviales (SIVOM, 2014) :

- Les effluents domestiques qui correspondent aux eaux usées provenant des usages sanitaires (toilettes, lavage de mains, douche …) et alimentaires (cantine, repas) ;
- Les effluents industriels sont traités à travers des processus notamment de type physico-chimique comme l'évapo-concentrateur, la filtration, filtre presse, ou micro filtration et la coagulation, floculation ou décantation ;
- Les eaux pluviales sont les eaux provenant des toits et parkings. Il est conseillé d'identifier les bouches d'eau pluviale et de tenir à proximité des kits *antipollution* .

L'organisation entre les acteurs

Le Syndicat National des Collecteurs du déchets liquides regroupe 290 entreprises sur l'ensemble de la France. Ces entreprises spécialisées effectuent la collecte des déchets industriels liquides et pâteux, toxiques et corrosifs sur l'ensemble de la France[49].

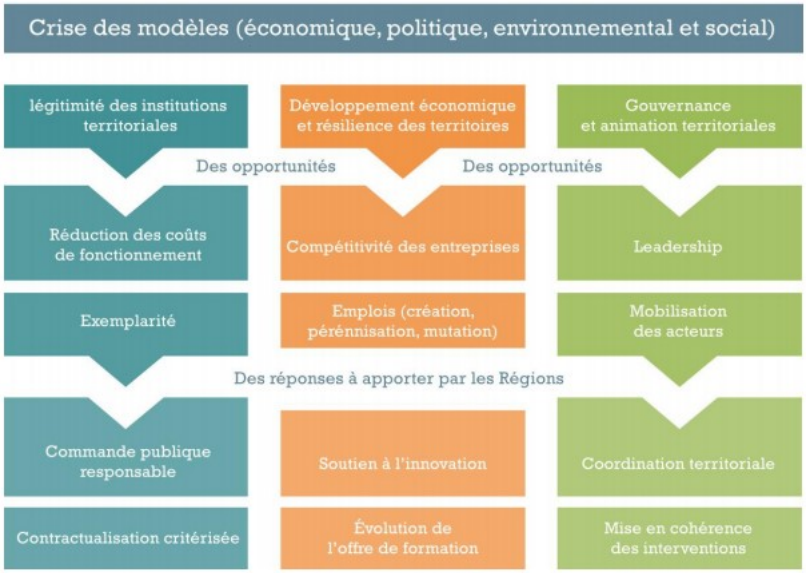
3.2.2 *Comment ?* : Les opportunités d'économie circulaire dans la chaine de valeur en France.

Apres cet introduction sur les typologies du déchet dans le point 3.2.1, cette partie traite des questions sur le chaine de valeur et les opportunité d'économies.

L'économie circulaire constitue une opportunité d'économies, de création d'activités et d'emplois, en s'inspirant des écosystèmes naturels dans le but de faire des déchets une ressource. L'ADEME a proposé un cadre pour analyser la légitimité des institutions, le développement économique et la gouvernance territoriale, qui génèrent des opportunités comme la réduction des couts de fonctionnement et la création des emplois, voir la figure 3.2.2.1.

[49] L'organisations des acteurs du Syndicat National des Collecteurs du déchets liquides peut être consulté en : *http://www.fnsa-vanid.org/sitesncdl/sncdl.html* (site consulté le 30 août 2015).

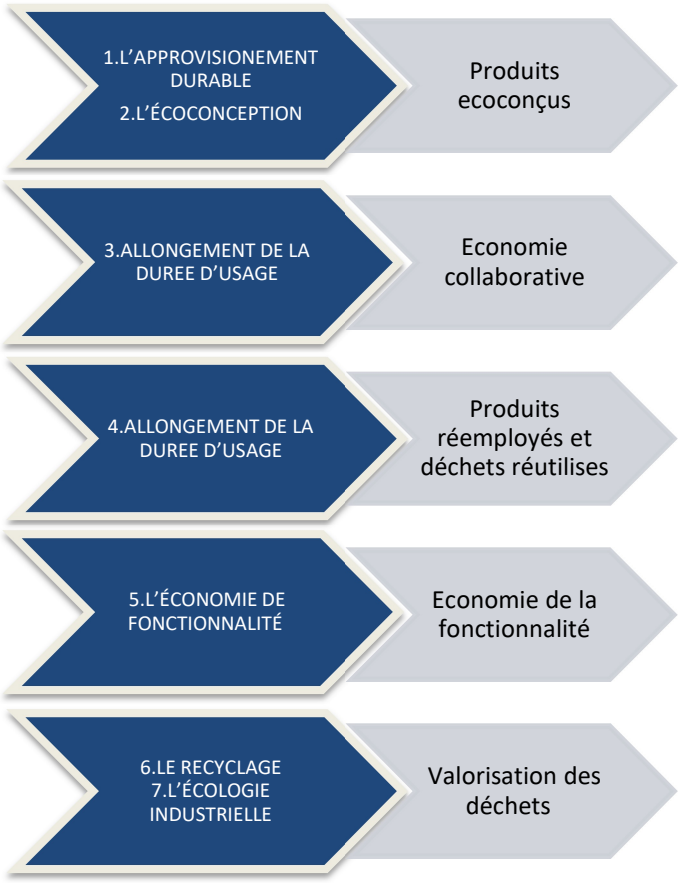
Figure 3.2.2.1: Les opportunités d'économie circulaire en France.



Source : ADEME, 2014b

Il nous semble important d'utiliser la notion de *chaînes de valeur*, entre les acteurs et les filières clés du territoire. De surcroît, l'approche intégrée de l'ADEME propose 7 piliers. Les piliers peuvent s'agréger dans 5 chaines de valeur dans la figure 3.2.2.2.

Figure 3.2.2.2: Les 5 chaînes de valeur de l'économie circulaire.



Source : L'auteur, adaptation ADEME, 2014b

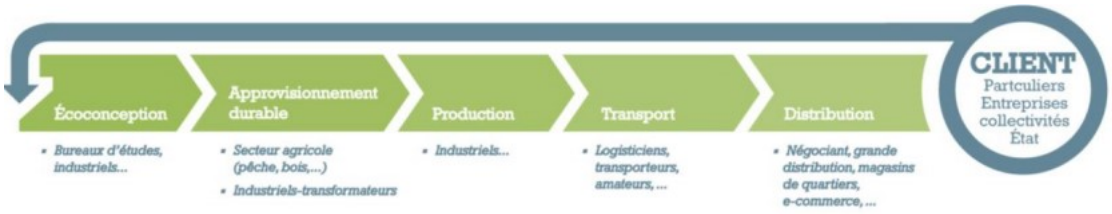
Comment ? : Les 5 chaînes de valeur de l'économie circulaire.

Apres cet présentation des chaînes de valeur, cette partie décrira chaque chaîne de valeur.

La première chaîne de valeur notamment les produits écoconçus[50] peut être appliquée aux filières de transformation industrielle. Les clients sont les particuliers, les entreprises, les collectives territoriales et l'État dans la figure 3.2.2.3.

[50] L'écoconception consiste à intégrer l'environnement dès la phase de conception des produits, qu'il s'agisse de biens, de services. Cette intégration repose sur une approche globale et multicritère de l'environnement et est fondée sur la prise en compte de toutes les étapes du cycle de vie des produits. Consulter en : *http://www.natexbio.com/eco-produits/eco-conception-et-eco-design* (site consulté le 29 août 2015).

Figure 3.2.2.3: La chaîne de valeur de produits écoconçus.



Source : ADEME, 2014b

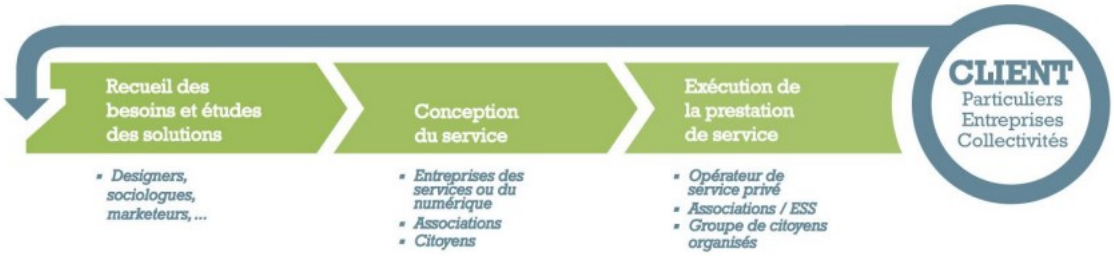
Le deuxième chaîne vise à explorer l'économie collaborative, laquelle désigne l'ensemble des pratiques qui consistent à se mettre directement en contact de particulier à particulier afin d'acheter, vendre, louer, échanger (ADEME-IPSOS, 2014). Selon Perret en 2014, ce champ d'innovation socio-économique est à la rencontre de deux dynamiques :

> *" Les premières sont des initiatives sociétales aux ressorts principalement économiques (stagnation du pouvoir d'achat) souvent renforcées par la volonté de rompre avec le consumérisme et de retrouver une position d'acteur de la réponse à ses propres besoins. Les deuxièmes sont des innovations économiques (essentiellement de nouveaux services de mis en relation et de sécurisation des échanges) obéissant à des motifs purement commerciaux "* (Perret, 2014).

L'étude de Perret précisé que la chaine d'économie collaborative relève d'une grande diversité de modèles:

1. Le prêt et la location entre particuliers (Zilok, Drivy) ;
2. La vente d'occasion, le troc et le don ;
3. La mutualisation des biens (covoiturage, collocation, couchsurfing) ;
4. L'échange de services (non monétaire ou par l'intermédiaire de monnaies locales dédiées) ;
5. La mise en commun de connaissances (crowdsourcing) ou de ressources financières (crowdfunding, prêt entre particuliers) ;
6. L'autoproduction collective (jardins ouvriers, autoréhabilitation du logement (fablabs) ;
7. Les circuits courts de commercialisation (AMAP) ;
8. La constitution de coalitions de consommateurs pour obtenir un meilleur prix ;
9. Des formes d'échange plus exigeantes impliquant de nouveaux styles de vie (Colunching, repas chez l'habitant...).

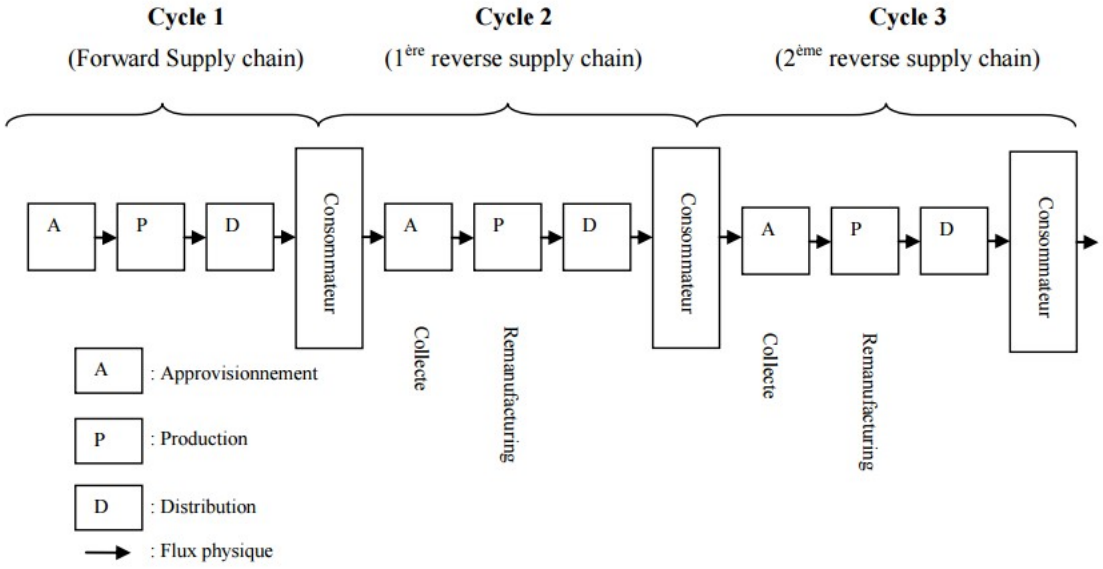
Figure 3.2.2.4: La chaîne de valeur de l'économie collaborative.



Source : ADEME, 2014b

Le troisième chaîne explore les produits réemployés et les déchets réutilisés. Les processus de *remanufacturing* [51] reposent sur une chaine de logistique inverse[52]. Egalement, la représentation en linéare des flux des produits en fin de vie ci-dessous permet de mettre en valeur la chaine de logistique inverse.

Figure 3.2.2.5: La chaine de logistique inverse.



Source : El Korchi, 2008

Selon la définition de Sundin :

> *" Le remanufacturing est un processus dans lequel des quantités suffisamment grandes de produits identiques sont acheminées vers un service central pour être complètement désassemblées. Les parties retirées sont nettoyées, triées et inspectées afin de réintégrer de nouveau le même produit ou être redirigées vers un autre processus de traitement "* (Sundin, 2004).

[51] En Français Remanufacturés

[52] La logistique inverse est le processus de planification, de mise en place et de contrôle de la performance afin de récupérer, créer ou disposer de la valeur quant aux produits vendus et les emballages associés, en minimisant l'impact sur l'environnement et l'utilisation des ressources mises en œuvre. Pour développement détaillé sur la chaine de logistique inverse, consulter le site: http://www.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/DGITM_Logistique_inverse_4p_web.pdf (site consulté le 30 août 2015).

Cette définition permet de regrouper une variété de processus répétitifs comme la collecte et la remanufacture (voir figure ci-dessus) dans chaque cycle, contribuant à la diminution dans génération du déchets.

Figure 3.2.2.6: La chaîne des produits réemployés et déchets réutilises.

Source : ADEME, 2014b

La quatrière chaîne de valeur notamment l'économie de la fonctionnalité vise à substituer la vente d'un bien par la vente de la fonction d'usage, quelques références clés sont utiles :

Tableau 3.2.2.1 : Définition d'économie de la fonctionalité

Auteur	*Définition*
Clarence Edwin Ayres	*" la tendance historique de proportionnalité entre croissance économique et consommation énergétique matérielle doit être terminée. En fait, cette proportionnalité n'existe pas, elle est simplement supposée. Les lois de la nature n'imposent aucun besoin minimal – ni de masse, ni d'énergie – pour produire une unité de PNB. "* [53]
Walter Stahel	*" l'économie de fonctionnalité, qui vise à optimiser l'utilisation – ou la fonction – des biens et services, se concentre sur la gestion des richesses existantes, sous la forme de produits, de connaissances ou encore du capital naturel. L'objectif économique en est de créer une valeur d'usage la plus élevée possible pendant le plus longtemps possible, tout en consommant le moins de ressources matérielles et d'énergie possible. Le but est d'atteindre ainsi une meilleure compétitivité et une augmentation des revenus des entreprises (…). "* [54]
Michel Godet	*" nous sommes passés d'une économie de destruction de biens à une économie de la fonctionnalité, d'optimisation des biens et de la recherche du bien-être. "* [55]
Ulrich Beck	*" nous passons d'une société de production dispendieuse à une société de production économe ».« Nous n'échangeons pas seulement des biens, mais aussi des maux ".* [56]

Source : L'auteur

[53] Pour développement détaillé sur la définition d'économie de la fonctionnalité, consulter le site: *http://economiedefonctionnalite.fr/definition-avantages/definition-detaillee/#more-20* (site consulté le 30 août 2015).
[54] Idem
[55] Idem
[56] Idem

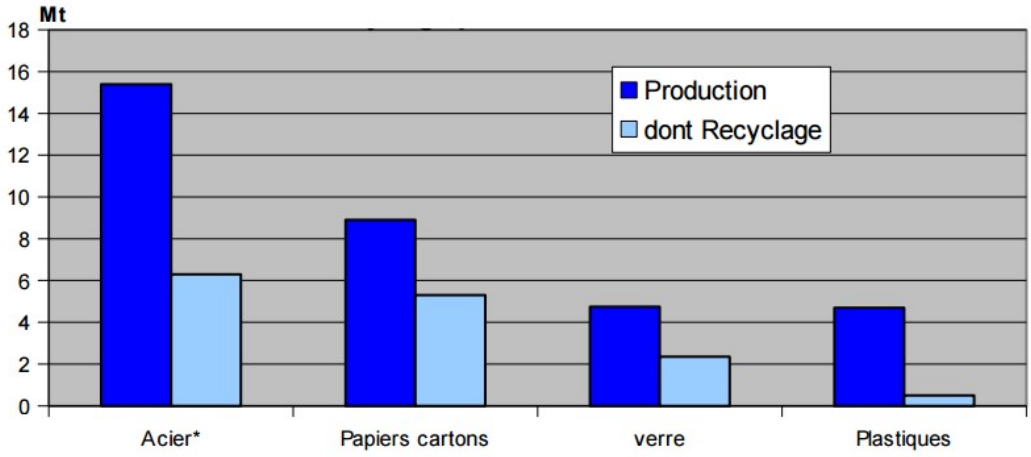
La nouvelle compréhension de la notion de valeur inhérente au modèle de l'économie de fonctionnalité a pour résultat la substitution de la vente d'une fonction d'usage. Les clients de l'économie classique faisant évoluer le modèle économique vers la vente ou prestation des services.

Figure 3.2.2.7: La chaîne de l'économie de la fonctionnalité.

Source : ADEME, 2014b

La cinquière chaîne de valeur correspond au recyclage, dans cet optique en 2010 la production du déchets en France a représenté 355 millions de tonnes, dont 30 millions de tonnes pour les ménages (voir graphique 3.2.2.8). En 2011, 12,9 millions de tonnes du déchets municipaux ont fait l'objet d'une valorisation (5,7 Mt en compostage/ méthanisation et 7,2 Mt en recyclage). Aujourd'hui, plus d'un million de tonnes du déchets d'emballages demeurent dans les ordures ménagères (Perret, 2014).

Graphique 3.2.2.8: Recyclage pour matériaux en France 2010.



Source : Perret, 2014

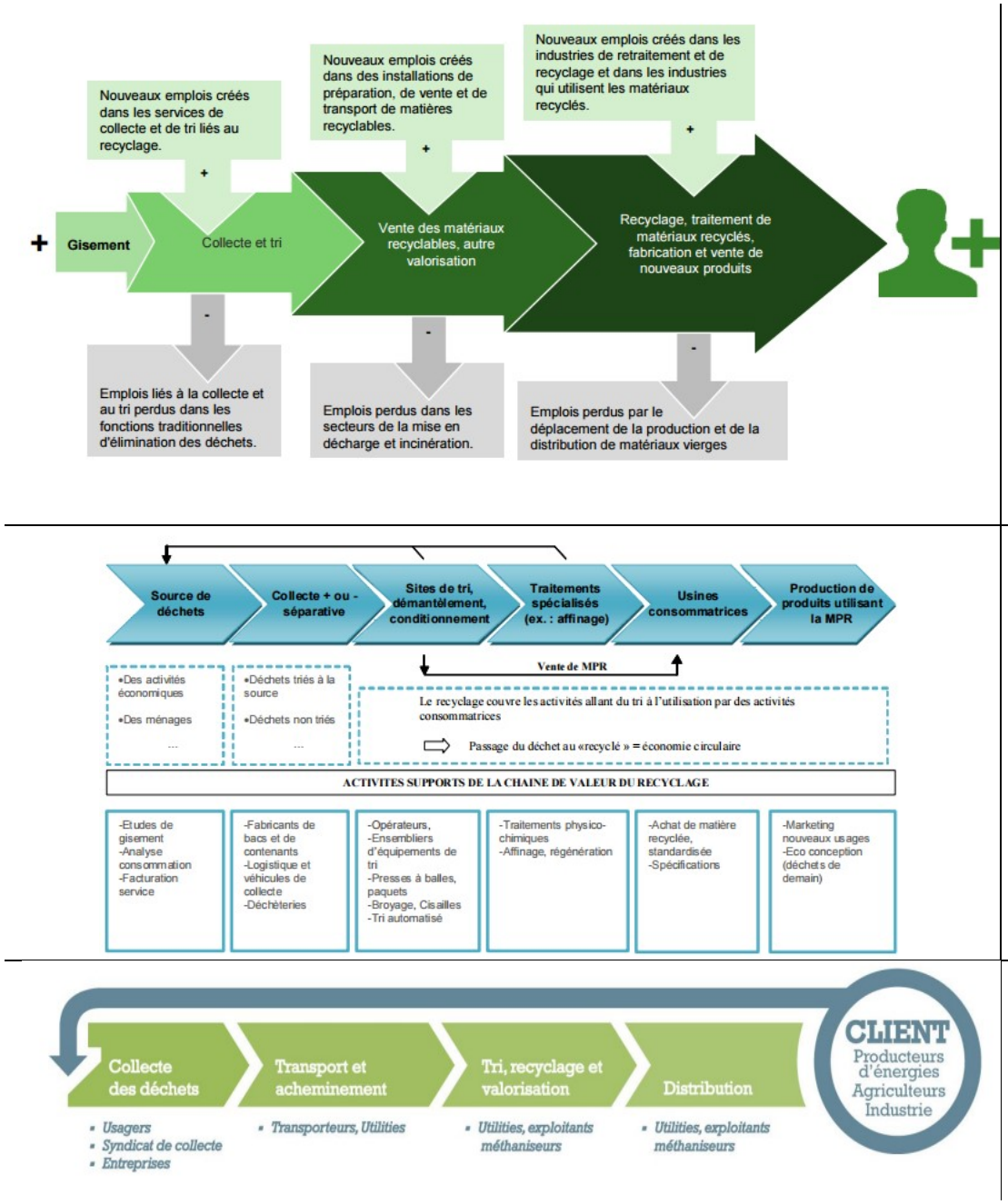
Le périmètre de la chaine de valorisation des déchets[57] comprend les producteurs des déchets dans les activités primaires de l'économie jusqu'aux consommateurs des matières recyclées. Le premier schéma de la figure 3.2.2.8 se focalise sur la création des emplois à travers la valorisation des déchets. Le deuxième

[57] L'Établissement public d'aménagement (EPA) Plain de France et Aéroports de Paris a fait une réflexion menée conjointement avec des acteurs du territoire. Le périmètre retenu correspond à celui de la commission territoriale du Grand Roissy de l'EPA Plaine de France. Il comprend 47 communes, réparties dans 3 départements. La méthode permettre à déterminer les éléments de gouvernance et les mécanismes de mise en œuvre pour l'EIT (Écologie industrielle et territoriale) sur le territoire du Grand Roissy (Nieto, 2014).

.

schéma explique le parcours cyclique des déchets entre les ménages, les sites de tri et les usines de traitement, en utilisant des activités de support de la chaine. Le troisième schéma désigne l'ensemble des pratiques qui consistent à mettre en contact la collecte des déchets, les producteurs d'énergie à travers de la méthanisation et les agriculteurs.

Figure 3.2.2.8: Les chaînes de valorisation des déchets.



Finalement, la chaîne de chaînes de valorisation des déchets sera utilisé dans la cinquième partie de la thèse pour exemplifier un bouclage de flux.

3.3 Conclusion du Chapitre 3

Il nous semble pertinent d'evoquer l'aplication des cinq pilliers de l'économie circulaire, lesquels ont été proposé par l'ADEME et leur chaînes de valeur associées par le biais des processus économiques réunis en boucle pour réduire la consommation des ressources. Cependant, cela ne suffira pas pour corriger la situation du bouclage de flux, il sera tout aussi important de renforcer les politiques destinées à la promotion d'une économie désindustrialisée, plus sobre en carbone, en énergie et en ressources naturelles non-renouvelables comme l'azote et le phosphore.

Dans ce contexte, l'économie circulaire est d'une côté, une application concrète et politique de l'écologie industrielle, il s'agit de recyclage, ré-usage, efficacité énergétique, technologies propres. D'un autre côté, il semble opportun d'intégrer la vision de la thermodynamique des systèmes ouverts qui laisse entrevoir la perspective d'un développement qui n'accélère pas l'entropie sur notre planète.

Pour finir, cette approche holistique permet d'intégrer les visions écologiques et industrielles aux enjeux écologiques, économiques, biophysiques et institutionnelles, dans un cadre transversal. Aux lenteurs inhérentes au changement institutionnel s'ajoutent la difficulté d'équilibrer les rapports entre les acteurs économiques de la politique de développement d'économie circulaire et ses protagonistes, la permanence de relations de domination entre les élites, les secteurs scientifiques et les secteurs économiques puissants d'un côtée, et les petits usagers et la société civile organisée de l'autre. L'adaptation de la gouvernance européenne au niveau local est un enjeu majeur.

4. APPROCHES D'INTEGRATION HYBRIDE DES CYCLES DE LA BIOSPHERE DANS LE MODELE INPUT-OUTPUT

UNE EVOLUTION VERS L'ECONOMIE CIRCULAIRE EST DEJA AMORCEE, il ne semble pas pour autant possible de généraliser ce nouveau modèle sans comprendre ses fondements économiques de base. Tout d'abord, l'ensemble des rapports entre les secteurs économiques et ses synergies d'échange peut être compris de manière adéquate par son expression en termes ventilés.

Dans ce sens, les modèles économiques multisectoriels sont l'un les instruments plus puissants, à la foi dans le domaine de la théorie économique que dans le domaine de l'économie appliquée et de l'analyse du changement structurel industriel, analytique, et des comptes nationaux.

Tout un groupe de modèles multisectoriels, avec des caractéristiques spécifiques, est souvent associé aux noms de Leontief, Von Neumann et Sraffa. L'élément commun à ces modèles peut être résumé en notant que tous ont une certaine orientation classique, au sens où les problèmes abordés et les éléments d'analyse sont proches des œuvres d'auteurs tels que les physiocrates, Ricardo ou Marx.

4.1. Quesnay et le *tableau économique*

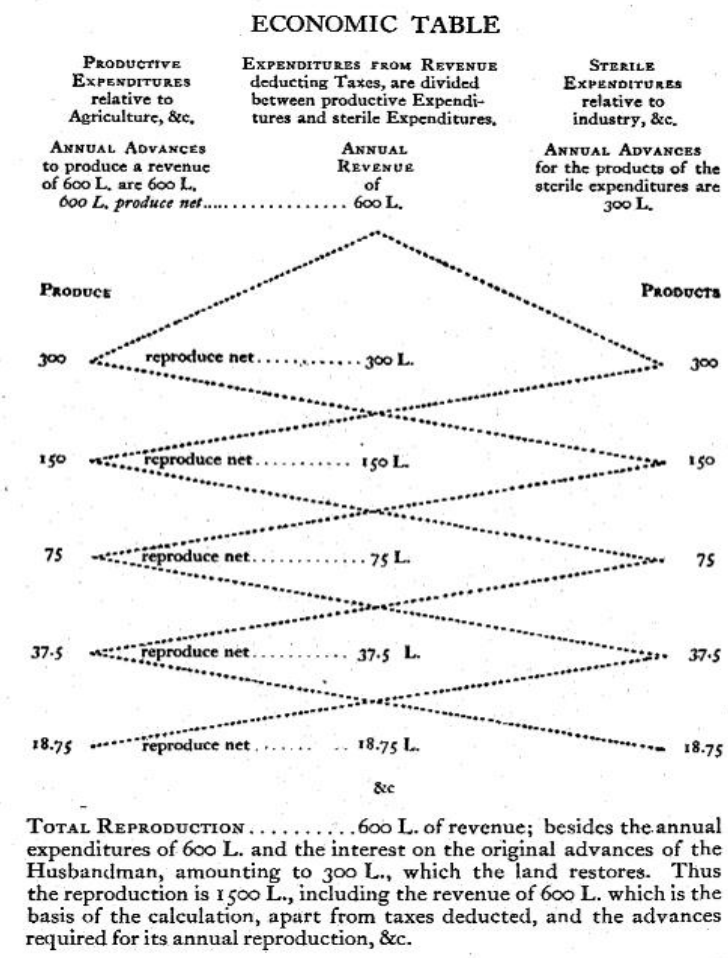
A la fin du XVIIIe siècle, François Quesnay a élaboré le premier modèle macroéconomique: le T*ableau économique* qui aborde l'économie sous la forme d'un circuit. François Quesnay entendait démontrer que la circulation des biens dans la société pouvait être comparée à la circulation des ressources naturelles dans la biosphère. Il conçoit donc que chaque classe dépend des autres classes à travers l'interdépendance des activités économiques.

D'abord, la *classe productive* est celle qui fait renaître par la culture du territoire les richesses annuelles de la nation, qui fait les avances des dépenses des travaux de l'agriculture, et qui paye annuellement les revenus des propriétaires terriens.

Puis la *classe des propriétaires* comprend le souverain, les possesseurs des terres et les décimateurs. Cette classe subsiste par le revenu ou *produit net* de la culture, qui lui est payé annuellement par la classe productive.

Enfin, la *classe stérile* est formée de tous les citoyens occupés à d'autres services et à d'autres travaux que ceux de l'agriculture, c'est-à-dire les commerçants et les artisans.

Figure 4.1.1 : Le tableau économique de Quesnay



Source : Quesnay, 1766

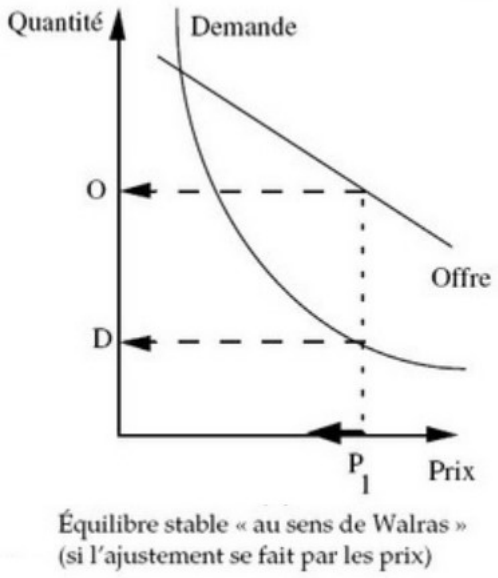
Le système de Quesnay montre les différents secteurs économiques et l'échange des paiements, et expose l'hypothèse d'un état d'équilibre économique stationnaire, concept fondamental à partir duquel se développe en grande partie l'analyse économique ultérieure et notamment l'analyse de l'équilibre général de Léon Walras et le tableau des intrants et sorties proposée par W. Leontief.

4.2. Léon Walras et la notion d'équilibre général

Dans le livre institulé *Éléments d'économie politique pure ou théorie de la richesse sociale* de 1874 Léon Walras expose sa première tentative de modéliser une économie pour expliquer la formation des prix. Dans ce sens, l'équilibre général est une théorie selon laquelle, le système des prix, qui finit par prévaloir sur les marchés concurrentiels, engendre une situation tel que sur le marché, tous les facteurs de production disponibles sont employés et rémunérés en fonction de leur apport productif. Selon Walras,

l'ajustement se fait sur tous les marchés par les prix, qui contiennent toute l'information sur les offres et les demandes[58].

Figure 4.2 : L'équilibre au sens de Walras



Source : Lallement, 1993[59]

Le problème de Walras s'exprime formellement par un système d'équations d'où la structure du modèle de Leontief a été directement tirée. Toutefois, ce n'est qu'au prix de transformations radicales des analyses de Walras que Leontief pourra conduire son analyse *input-output* (Akhabbar, 2011).

4.2.1 Leif Johannson et l'équilibre général calculable

Les modèles d'équilibre général calculable (MEGC) sont une classe de modèles économiques qui utilisent des données économiques réelles pour estimer comment une économie pourrait réagir à des changements de politique, de technologie, de ressources, ou d'autres facteurs externes. La structure du modèle de MEGC est directement tirée de la théorie de Leontieff. Toutefois, il repose sur l'hypothèse selon laquelle les marchés d'une économie tendent vers l'équilibre, mais attribuent un rôle plus important sur les prix. Le premier MEGC a été développé par Leif Johansen en 1960.

[58] Pour développement détaillé sur la notion d'équilibre du Léon Walras, consulter l'ouvrage de Nême, C de 2001 sur *La pensée économique contemporaine*, Economica.

[59] Pour développement plus complété sur l'offre et la demande dans une *équilibre stable* au sens de Walras, consulter l'ouvrage de Lallement, J de 1993 sur la *Nouvelle historie de la pensée économique vol n°2*

Un des modèles les plus connus d'EGC est global: le modèle GTAP du commerce mondial, parmi les modèles les plus connus le Mirage. Ce modèle est composé des bases de données qui décrivent les flux commerciaux bilatéraux, la production, la consommation, et l'utilisation intermédiaires de biens et services.

MIRAGE développe pour CEPII

MIRAGE (*Modelling International Relationships in Applied General Equilibrium*) est un modèle d'équilibre général calculable multisectoriel et multirégional, destiné à l'analyse des politiques commerciales. Il incorpore des éléments de concurrence imparfaite, de différenciation des produits par variétés et par gamme de qualité, et d'investissement direct à l'étranger, dans un cadre dynamique séquentiel où le capital installé est supposé immobile. Les inerties d'ajustement y sont liées à la réallocation du stock du capital. MIRAGE s'appuie sur une mesure bilatérale très détaillée des barrières aux échanges et de leur évolution sous différentes hypothèses, grâce à la base MacMap.

Le CEPII (Centre de recherche français dans le domaine de l'économie internationale) développe aussi une version mise à jour du modèle, appelée MIRAGE-e, qui incorpore une description plus détaillée de la consommation d'énergie et des émissions de CO_2, de aussi une nouvelle trajectoire de référence à l'horizon 2100.

4.3. Wassily Leontief : la méthode entrée-sortie (*Input-Output* ou I/O)

Généralités

Leontief est l'auteur de travaux sur l'analyse interindustrielle de l'économie aux Etats-Unis en 1936, travaux dans lesquels il a développé un tableau d'échanges interindustriels (TEI) ou tableau d'entrées sorties (TES) en unités monétaires (dollars) qui comprend 5 activités économiques. Il exprime les comptes nationaux dans une approche *produit* .

Figure 4.3.1. Le tableau entrées - sorties.

Tableau des ressources en produits	*Tableau des entrées intermédiaires* *Produits en ligne* *Branches en colonne*	*Tableau des emplois finals*

Source : Élaboration propre à partir de A,Tukker, et al 2009 et J.-L Pasquier 2012.

Pour un produit donné, l'équilibre de ressources et emplois (ERE) ou compte de produit recense l'ensemble des ressources de ce produit (figure 4.3.1). Tout compte de produit est élaboré à partir de l'équation fondamentale d'équilibrage entre ressources et emplois :

Une formalisation :

$Ressources = Emplois$

$Ressources = P + M + marges + impôts\ nets\ de\ subventions$

$Emplois = CI + CF + FBCF + OV + VS + X$

Ressources

P	Production du produit, aux prix de base
M	Importations de biens et services, aux prix CAF
Marges	Total des marges de transport et des marges commerciales
Impôts nets de subventions	Impôts sur les importations ou droits de douane + autres impôts sur les produits - subventions sur les produits

Emplois

CI	Consommations intermédiaires
CF	Dépenses de consommation finale
FBCF	Formation brute du capital fixe
OV	Acquisitions moins cessions d'objets de valeur
VS	Variations de stocks
X	Exportations de biens et services

Ces équilibres sont basés sur les hypothèses suivantes :

D'abord, il n'existe pas de production jointe, chaque processus produit un seul produit homogène.

Ensuite, les coefficients techniques restent constants, la quantité des *inputs* nécessaires pour produire des *outputs* est indépendante du niveau de production.

Enfin, il n'existe pas de techniques alternatives, chaque *input* est produit avec un seul type de technologie.

Deux types de modèles I/O

Leontief a effet développé deux modèles, le premier, appelé fermé, caractérisé par le fait que l'ensemble des facteurs de production est identique aux produits, la demande finale est incluse dans la matrice de consommation intermédiaire comme un secteur. l'économie des Etats-Unis est un exemple de ce modèle (Miller *et al.* 2009). Le deuxieme est un modèle d'entrée-sortie ouvert d'une économie dans son ensemble, une entrée supplémentaire apparait la demande finale (consommations des ménages) et est considérée comme exogène. Il est supposé que cette entrée supplémentaire est similaire à certaine catégorie du travail homogène.

4.3.1 La interpretation de la matrice inverse de Leontieff : les exigences directes et indirectes de travail

Karl Marx a construit sa theorie en utilisant des blocs intelectuelles de la théorie classique de la production et du coût développé entre autres par François Quesnay, Adam Smith et David Ricardo. À cet égard, la théorie classique de la valeur a suivi un parcours similaire à celle suivie par Wassily Leontief dans ses équations du modèle *input-output* (I/O).

Egalement, une formalisation du tableau I/O peut être fait en supposant que le tableau se comporte de n lines et n colonnes. Dans ce système les quantités physiques de la $i^{éme}$ marchandise de n industries qui sont representées pour $q_{i1}, q_{i2}, \mathrm{K}, q_{ij}, \mathrm{K}, q_{in}$ et affectués aux branches $1,2,\mathrm{K}, j,\mathrm{K}, n$, suit p_i représenté le prix de la marchandise. Les transactions entre les marchandises et les industries peuvent être montrées dans le tableau suivant :

Tableau 4.3.1 : Matrice de transactions du modele I/O

Entrées	*Sorties* Industrie 1	Industrie 2		Industrie j		Secteur final (Colonne n)
Marchandise 1	$q_{11}p_1$	$q_{12}p_1$	…	$q_{1j}p_1$	…	$q_{1n}p_1$
Marchandise 2	$q_{21}p_2$	$q_{22}p_2$	…	$q_{2j}p_2$	…	$q_{2n}p_2$
	M	M		M		M
Marchandise i	$q_{i1}p_i$	$q_{i2}p_i$	…	$q_{ij}p_i$	…	$q_{in}p_i$
	M	M		M		M
Secteur Final (ligne n)	$q_{n1}p_n$	$q_{n2}p_n$	...	$q_{nj}p_n$	…	$q_{nn}p_n$

Source : L'auteur à partir de Passinetti, 1985

La colonne final de droite du tableau dont *Secteur final* peut être transforme en appelant les quantités totales produit des marchandises $1,2,\text{K},n$ comme Q_1,Q_2,K,Q_n. La relation entre les quantités de chaque secteur (industrie) et les quantités totales peuvent étre presentés comme :

$$\sum_{j=1}^{n} q_{ij} = Q_i, \qquad i = 1,2,\text{K},n. \tag{4.3.1.1}$$

En divisant le tableau 4.3.1 en trois section, les equation peuvent être presentées sur la figure 4.3.1.1.

Figure 4.3.1.1 : Formulation algebraique de la matrice des transactions du modele I/O

$$\left.\begin{aligned} q_{11}p_1 + q_{12}p_1 + \text{K} + q_{1n}p_1 &\equiv Q_1p_1 \\ q_{21}p_2 + q_{22}p_2 + \text{K} + q_{2n}p_2 &\equiv Q_2p_2 \\ \text{M}\quad\ \text{M}\quad\ \ \text{M}\quad\ \text{M} & \end{aligned}\right\} \text{1er groupe}$$

$$\left.\begin{aligned} q_{n1}p_n + q_{n2}p_n + \text{K} + q_{nn}p_n &\equiv Q_np_n \\ q_{11}p_1 + q_{21}p_2 + \text{K} + q_{n1}p_n &\equiv Q_1p_1 \\ q_{12}p_1 + q_{22}p_2 + \text{K} + q_{n2}p_n &\equiv Q_2p_2 \\ \text{M}\quad\ \text{M}\quad\ \ \text{M}\quad\ \text{M} & \\ q_{1n}p_1 + q_{2n}p_n + \text{K} + q_{nn}p_n &\equiv Q_np_n \end{aligned}\right\} \text{2ème groupe}$$

Source : L'auteur à partir de Passinetti, 1985

En 1985, Passineti a proposé de simplifier les prix du première système d'equations en divisant pour un même prix tous les termes. Cette transformations est imposible dans le deuxième groupe d'équations.

Nous pouvons introduire une définitions pour obtenir les coefficients de production et de consommation intersectorielles a_{ij} posons :

$$\frac{q_{ij}}{Q_j} = a_{ij} \tag{4.3.1.2}$$

Les coefficients a_{ij} de la matrice A , matrice carrée non négative d'ordre (n-1) des coefficients interindustrielles, sont appelés besoin direct du bien i au industrie j. Si cette industrie fait partie d'un système complet, la production de cet industrie nécessite l'utilisation d'autres entrées. De même, ces industries peuvent également nécessiter l'entrée i donc l'industrie j devra produire une quantité supérieure à celle consommée par elle-même et fournir d'autres industries qui lui fournissent des intrants. Les entrées exigées par ces sociétés constituent donc des besoins indirecte de i par l'industrie j.

Cet relation entre Q_j et a_{ij} peut être re-exprimé comme :

$$q_{ij} = a_{ij}Q_j, \quad i, j = 1,2,\text{K}\ ,n \tag{4.3.1.3}$$

La figure 4.3.1.2 presenté deux système qui expriment les quantités physiques $Q_1, Q_2, \text{K}\ , Q_n$ et les prix des marchandises $p_1, p_2, \text{K}\ , p_n$.

Figure 4.3.1.2 : Reformulation algebraique de la matrice des transactions du modele I/O

$$\begin{aligned}
a_{11}Q_1 + a_{11}Q_1 + \text{K} + a_{11}Q_n &\equiv Q_1 \\
a_{21}Q_1 + a_{22}Q_2 + \text{K} + a_{2n}Q_n &\equiv Q_2 \\
\text{M} \quad \text{M} \quad \text{M} \quad \text{M} & \\
a_{n1}Q_1 + a_{n2}Q_2 + \text{K} + a_{nn}Q_n &\equiv Q_n \\
a_{11}p_1 + a_{21}p_2 + \text{K} + a_{n1}p_n &\equiv p_1 \\
a_{12}p_1 + a_{22}p_2 + \text{K} + a_{n2}p_n &\equiv p_2 \\
\text{M} \quad \text{M} \quad \text{M} \quad \text{M} & \\
a_{1n}p_1 + a_{2n}p_n + \text{K} + a_{nn}p_n &\equiv p_n
\end{aligned}$$

Source : L'auteur à partir de Passinetti, 1985

En outre, dans une modèlè I/O ouvert le système de equation de la Figure 4.3.1.2 peut être réécrit sous la forme classique de Leontief : $(I - A)Q = \overline{Y}$ avec : I matrice identité d'ordre (n-1), Q , vecteur colonne des (n-1) quantités physiques de marchandises à produire pour l'économie et $\overline{Y}$, vecteur de la demande finale de (n-1) colonne.

Figure 4.3.1.3 : Matrice des transactions et vecteur des coefficients de travail

$$\begin{bmatrix} (1-a_{11}) & -a_{12} & \text{K} & -a_{1,n-1}, \\ -a_{21} & (1-a_{22}) & \text{K} & -a_{2,n-1} \\ . & . & \text{K} & . \\ . & . & \text{K} & . \\ . & . & \text{K} & . \\ -a_{n-1,1} & -a_{n-1,2} & \text{K} & (1-a_{n-1,n-1}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Q_1 \\ Q_2 \\ . \\ . \\ . \\ Q_{n-1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \overline{Y}_1 \\ \overline{Y}_2 \\ . \\ . \\ . \\ \overline{Y}_{n-1} \end{bmatrix}$$

$$a_{n1}Q_1 + a_{n2}Q_2 + \quad \text{K} \quad + a_{n,n-1}Q_{n-1} \qquad = L$$

Source : L'auteur à partir de Passinetti, 1985

L désigne, dans cette dernière équation de la figure 4.3.1.3, le nombre de travailleurs employées.

Etant donné $rg(I-A) = n-1$, $(I-A)$ est una matrice non singulière, dont qui a une inverse ; donc, en reprenant $(I-A)Q = \overline{Y}$ on aura egalement $Q = (I-A)^{-1}\overline{Y}$, cette équation $(I-A)^{-1}$ represente les exigences directes et indirectes de travail (Passineti, 1985).

Pour résumer, pour evaluer la valeur d'un marchandise, il faut compter le travail direct et indirect, notament les moyéns de production qui ont été utilisé dans la fabrication de la marchandise (Abraham-Frois, 1992).

4.3.2 Le passage du tableau I/O aux système des equations de production jointe

Cette partie explicite comme passer d'un structure de type *input-output* à une strcture de production jointe. Les *équations* de la partie 4.3.1 sont ici prises em compte.

La matrice *A de input* est *décomposable*, c'est-à-dire qu'elles peut être mise sous la forme de blocs triangulaires grâce à une permutation de ligne et de colonne. La matrice appelée *transposée de A* peut être obtenue en permutant les lignes et les colonnes de *A* de type *m x n*[60]:

$$A = [A_{ik}]_{mxn} \; A' = [A'_{ik}]_{nxm} = [A_{ki}]_{mxn} \qquad (4.3.2.1)$$

[60] On peut représenter une matrice *A*, par un lettre mayuscule *A* ou par le symbole $\|A_{ij}\|$ ou par $\lfloor A_{ij} \rfloor$ avec *i*=1,2,3,...,*m* et *j*=1,2,3,...,*n* ; ou bien par $\lfloor A_{ij} \rfloor_{mxn}$. Un matrice de type *m x n* ou de *m* lignes et *n* colonnes et dite rectangulaire, si $m \neq n$, si au contraire $m = n$ la matrice est carrée d'ordre *n*, ou *n* designe le même nobre de ligne et de colonne (Passinetti, 1985).

Si A es la matrice du tableau 4.3.1 donc A' sera :

Tableau 4.3.2 : Matrice de production jointe (*industrie x marchandise*)

	Marchandise 1	Marchandise 2		Marchandise j		Secteur final (Colonne n)
Industrie 1	$q_{11}p_1$	$q_{12}p_1$	$\cdots$	$q_{1j}p_1$	$\cdots$	$q_{1n}p_1$
Industrie 2	$q_{21}p_2$	$q_{22}p_2$	$\cdots$	$q_{2j}p_2$	$\cdots$	$q_{2n}p_2$
	M	M		M		M
Industrie i	$q_{i1}p_i$	$q_{i2}p_i$	$\cdots$	$q_{ij}p_i$	$\cdots$	$q_{in}p_i$
	M	M		M		M
Secteur Final (ligne n)	$q_{n1}p_n$	$q_{n2}p_n$	$\cdots$	$q_{nj}p_n$	$\cdots$	$q_{nn}p_n$

Source : L'auteur

En bref, cette partie a présenté la version la moins complexe de la structure *des industries pour des marchandises* de la production jointe. Il sera largement explore aux chapitres V et VIII de la thèse.

4.4. Présentation des modèles input-output intégrant l'environnement

Après cette présentation de la méthode I/O, cette partie se focalisera sur une structure en utilisant des numéraires physiques.

La représentation physique des processus de la nature a bien été maîtrisé pour les disciples de Leontieff. Mais le sujet qui reste à maîtriser est la relation des prix relatives et de la valeur entre les commodités de l'économie et les services de l'environnement.

Les modèles I/O de l'environnement peuvent être classifiées selon cinq critères spécifiques. Citons quelques passages de la revue de la littérature sur les comptes des matières résiduelles solides de l'Institut de la Statistique du Québec (2011) :

Le critère de l'applicabilité.

> *" Les PIOT sont plutôt complexes et leur implantation nécessite une quantité de ressources humaines et financières considérables. Ainsi, selon Stahmer et autres (1996), les coûts de comptabilisation d'un tableau entrées-sorties complet de type PIOT seraient équivalents à la comptabilisation des comptes entrées-sorties monétaire ou physiques. Statistique Canada estime que l'implantation de tableaux PIOT représenterait plusieurs millions de dollars annuellement "* (Statistique Canada, 2006).

Le critère de la comparabilité.

> *“ La comptabilisation des PIOT est récente et sa méthodologie est loin d'être standardisée au niveau international. La méthodologie qu'Eurostat a commencé à élaborer principalement sur la base des modèles de l'Allemagne et du Danemark, des pionniers dans le domaine, et la brève mention des tableaux PIOT dans le SCEE 2003 ne suffit pas à assurer une harmonisation des concepts et méthodes. La comparabilité est donc limitée. Ceci se reflète aussi dans le petit nombre de pays européens ayant implanté ces tableaux. Dans un rapport concernant le développement d'une balance commerciale en unités physiques pour l'Europe, Hubacek et Giljum expliquent certaines des disparités entre les PIOT existants”* (Hubacek *et al.* 2001).

Le critère de la désagrégation.

> *“ Généralement, à l'égard du degré de désagrégation des secteurs générant les flux de résidus, le modèle PIOT est plus détaillé que le modèle MFA, mais moins que les modèles NAMEA et WIO. Toutefois, ce modèle permet d'obtenir de l'information quant aux flux intersectoriels de matières en unités physiques, de sorte que les flux de matières réabsorbées entre les différents secteurs sont comptabilisés. Concernant la classification des types de matières résiduelles solides comptabilisées, certains PIOT présentent des catégories de résidus fortement agrégées (p. ex. : Italie, Finlande) diminuant les possibilités d'analyse du modèle ”* (Hoekstra *et al.* 2006)

Le critère de l'indicateur.

> *“ Plusieurs utilisations sont possibles pour les tableaux entrées-sorties physiques. Ainsi, tout comme le modèle MFA, le modèle PIOT comptabilise les flux de matières entre les sphères économique et environnementale. Ceci permet d'examiner les relations entre les intrants, les produits et les résidus de chaque secteur. Enfin, à l'aide d'outils propres à l'analyse entrées-sorties, comme la matrice inverse de Leontief, il est possible de calculer les flux indirects de matières générés par la chaîne de production et de les attribuer aux catégories de la demande finale (Giljum, 2006, p. 18). Somme toute, plusieurs utilisations seraient possibles à des fins d'analyse, dont l'analyse de décomposition structurelle que nous verrons plus en détail lors de la description du modèle NAMEA”* (OCDE, 2008).

Le critère de la comptabilité.

> *“ Comme tous les modèles entrées-sorties, les PIOT sont compatibles avec le SCN, car ils utilisent la même structure que les tableaux entrées-sorties monétaires. Par contre, bien que certaines données des PIOT soient dérivées des MIOT, la simple conversion à l'aide d'un vecteur de prix n'est pas possible. ”*

Classement spécifique selon une combinaison des critères

En outre, les modèles peuvent être classifiés selon le numéraire d'analyse (unîtes monétaires ou physiques) ou selon le type de matrice (industrie pour industrie ou produit pour industrie). Egalement, dans le modèle d'économie écologique (industrie pour industrie) inclut une submatrice dans la consummation intermédiaire pour montrer les *flux physiques et monétaires* entre les systèmes écologiques. En somme, Cette type de classement pour numéraire sera exploré dans la section suivant.

4.4.1 Les modèles I/O : Les numéraires monétaires

Modèle Cumberland (1966)

Cumberland est le premier chercheur ayant intégré les secteurs de l'environnement au modèle I/O en utilisant un modèle *industry by industry* . Aujourd'hui les méthodes de formalisation ajoutent les bénéfices environnementaux en valeur, les coûts environnementaux en valeur et les coûts de restauration de l'environnement en valeur.

Tableau 4.4.1. Le tableau des entrées et sorties de Cumberland.

Purchasing Sector / Producing Sector			Intermediate Sale						Final Demand							
			Agriculture	Manufacturing	Service	Trade	Other	Total *Intermediate*	Household	Capital Formation	Government	Total Final Demand	Total Purchases by Regional Economy	Total Exports	Gross Regional Product Total Purchases From Regional Economy	Environmental Balance
			1	2	j	·	n	w	C	I	G	Y	D	E	X	B
Intermediate Purchases	Agriculture	1	x_{11}	·	x_{1j}	·	x_{1n}	w_1	C_1	I_1	G_1	Y_1	D_1	E_1	X_1	B_1
	Manufacturing	2	·													
	Services	i	x_{i1}		x_{ij}	·	x_{in}	w_i	C_i	I_i	G_i	Y_i	D_i	E_i	X_i	B_i
	Trade	·	·													
	Other	n	x_{n1}		x_{nj}		x_{nn}	w_n	C_n	I_n	G_n	Y_n	D_n	E_n	X_n	B_n
	Total Intermediate	u	u_1	·	u_j	·	u_n	w_n	C_u	I_u	G_u	Y_u	D_u	E_u	X_u	B_u
Value Added	Wages and Salaries	L	L_1		L_j		L_n	L_w	C_L	I_L	G_L	Y_L	D_L	E_L	L	B_L
	Other Household Income	R	R_1		R_j		R_n	R_w	C_r	I_r	G_r	Y_r	D_r	E_r	R	B_r
	Regional Personal Income	H	H_1		H_j		H_n	H_w	C_h	I_h	G_h	Y_h	D_h	E_h	H	B_h
	Business Savings	F	F_1		F_j		F_n	F_w	C_f	I_f	G_f	Y_f	D_f	E_f	F	B_f
	Government Receipts	T	T_1		T_j		T_n	T_w	C_t	I_t	G_t	Y_t	D_t	E_t	T	B_t
	Value Added	V	V_1		V_j		V_n	V_w	C_v	I_v	G_v	Y_v	D_v	E_v	V	B_v
	Total Sales by Regional Economy	S	S_1		S_j		S_n	S_w	C_s	I_s	G_s	Y_s	D_s	E	X	B
	Total Imports	M	M_1		M_j		M_n	M_w	C_m	I_m	G_m	Y_m	M			
	Total Sales to Regional Economy	Z	Z_1		Z_j		Z_n	Z_w	C	I	G	Y	D			
	Environmental Benefits (+) Environmental Costs (−) Environmental Balance	Q C A	A_1		A_j		A_n	A_w	A_c	A_i	A_g	A_y	A			

Source : Cumberland, 1966

Le modèle Hannon (2001)

Il calcule le PIB en incluant les coûts et bénéfices environnementaux de Cumberland.

4.4.2 Les modèles I/O : les numéraires physiques et monétaires

Généralités

Plusieurs types d'analyses sont à la base des modèles en unités physiques I/O. En effet, on peut distinguer les flux physiques selon leur origine (ressources ou *supply*) ou leur destination (emplois ou *use*). Ces tableaux peuvent être mis côte à côte pour constituer un seul tableau « global » ressources-emplois, soit un *physical supply-use table* (PSUT). Les tableaux physiques d'emplois et de ressources sont asymétriques : les produits et les matières sont sur les lignes, alors que les secteurs productifs et les catégories de la demande finale sont en colonnes. L'intégration des deux tableaux asymétriques d'intrants et d'extrants forme un tableau entrées-sorties physique. Le tableau entrées-sorties physique complet et symétrique peut être exprimé de deux façons. Premièrement, il peut donner les flux matériels intersectoriels (tableau *industries par industries ou industry by industry*). Deuxièmement, il peut aussi être exprimé selon les matières et donner ainsi les liens quantitatifs entre les matières (*tableau matières par matières*) (Pedersen *et al.* 2006) (on peut trouver plus de renseignement sur les modèles I/O de l'environnement dans l'annexe IV.A).

Le modèle Daly (1968)

Une matrice I/O *industry by industry* intègre 4 types de flux :

1. Echanges des inputs dans l'économie : il s'agit des flux de matière et d'énergie qui sont produits et consummés au sein du domaine humain ou processus domestique (O'Connor, 2009).

   Les processus domestiques sont représentés dans *le petit cycle* : il s'agit de processus complètement pilotés par l'homme de début à la fin (par exemple la manufacture des biens et des services). Les processus peuvent être démarrés et arrêtés à tout moment. Il s'agit par exemple du processus de fabrication des chaussures.

2. Accumulation d'émissions polluantes et de déchets dans l'environnement : il s'agit des flux de matières et d'énergie qui transitent depuis le domaine humain vers la nature. Cela correspond aux processus représentés dans *le cycle moyen* : partiellement gérés par la nature comme l'agriculture, qui peuvent être appelés *nature domestiquée* (O'Connor, 2009). Ce type de processus est piloté par l'homme, mais il n'est pas maîtrisé par celui-ci du début à la fin. Il existe nombre variables déterminées par des éléments exogènes au système.

3. Consommation de ressources naturelles : il s'agit des flux produits depuis le domaine non-humain et dont les processus naturels sont appropiés par le domaine humain. Il s'agit de la combinaison des processus de petit et moyen cycle.

4. Processus écologiques internes à l'écosystème : il s'agit de processus représentées dans le *grand* cycle ou cycles biogéochimiques non gérés par l'homme (le processus de transport de substances dans l'océan ou encore le changement climatique) (O'Connor, 2009).

Tableau 4.4.2.1. Le tableau des entrées et sorties de Daly.

			INPUT											
			Humain			Non-Humain								
			Agriculture	Industries *i*	Consommation finale des ménages	Animaux	Plantes	Bactéries	Atmosphère	Hydrosphère	Lythosphère	Puits (consommation finale)	Total
OUTPUT	Humain	Agriculture	Echanges input dans l'économie			Accumulation d'émissions polluantes et des déchets dans l'environnement							
		Industries *i*											
		Consommation finale des ménages											
	Non Humain	Animaux	Consommation des ressources naturelles			Processus écologiques internes à l'écosystème –ex : flux de l'azote et phosphore dans l'atmosphère et lithosphère.							
		Plantes											
		Bactéries											
		Atmosphère											
		Hydrosphère											
		Lithosphère											
		Soleil											

Source : adapté de Daly, 1968, Cordier 2011

Le modèle d'Isard (1968)

Walter Isard est connu principalement comme le fondateur de la science régionale qui s'intéresse entre autres aux analyses écologiques et environnementales, à la gestion des ressources en utilisant les analyses entrée-sortie. Dans ce sens, Isard est rejoint par Wassily Leontief qui l'aide à adapter son idée de modèle entrée-sortie de l'échelle nationale à une économie locale.

Le modèle d'Isard et le modèle de Daly de 1968 représentent les flux de matière et d'énergie entre le système économique et le système écologique. Il existe une différence fondamentale entre Daly et Isard, sur laquelle nous devons être clairs, le modèle de Isard utilise des coefficients techniques empruntés à la littérature scientifique alors que Daly trouve les coefficients dans les données de la notabilité du tableau I/O (Victor, 1972 a,b).

Tableau 4.4.2.2 Le tableau des entrées et sorties d'Isard.

			INDUSTRY					
			Activités Economiques			Processus Ecologiques		
			Agriculture	Industrie *i*	Industrie ...*n*	Nitrification	Processus *p*	Processus ...*n*
COMMODITIES	Produits Economiques	Laitue	Système économique			Processus écologiques		
		Produit....*i*....						
		Produit...*n*						
	Produits Ecologiques	Nitraté	Secteurs économiques			Système écologique		
		Produit..*k*...						
		Produit..*m*						

Source : adapté d'Isard, 1968, Victor 1972a, McDonald, 2005 et Cordier 2011

La matrice I/O *commodities by industry* intègre 4 types de coefficients techniques :

1. Coefficients techniques intersectorielles du système économique ou de processus représentés dans *le petit cycle et le cycle moyen.* il s'agit de processus complètement ou partiellement gérés par l'homme comme l'agriculture, qui peuvent être appelés comme *la nature domestiquée* (O'Connor, 2009).

2. Coefficients techniques des produits économiques produits et consommés par l'écosystème.

3. Coefficients techniques des produits écologiques produits et consommés par l'économie.

4. Coefficients techniques des produits écologiques produits et consommes par l'écologie. Il s'agit des processus représentés dans *le grand cycle* (O'Connor, 2009) ou cycles biogéochimiques non gérés par l'homme (processus de nitrification et dénitrification de l'azote dans la lithosphère).

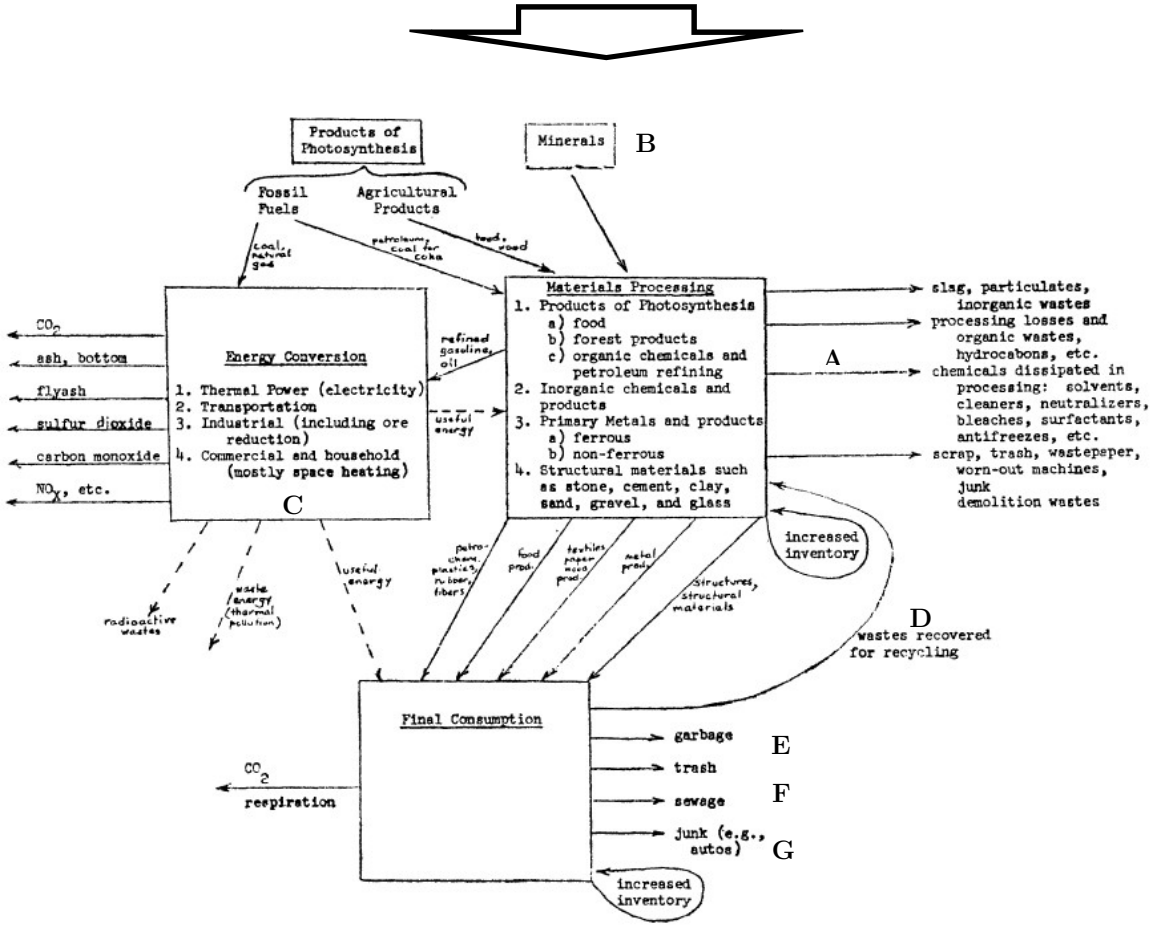
Le modèle d'Ayres-Kneese (1969)

La structure qui a été proposé par Ayres *et al.(*1969) intègre le modèle de Daly dans un tableau *industry by industry* à la fois la première loi et la deuxième loi de la thermodynamique et donc, l'élimination des polluants, le recyclage et la conservation de la matière.

Tableau 4.4.2.3. Le tableau de flux de matière d'Ayres-Kneese.

Matrice des inputs en ressources naturelles	**A** : Quantité de polluants ou du déchet rejeté dans le milieu naturel		
Matrice I/O + secteur d'élimination des déchets et de recyclage	**B** : Secteurs d'extractions des ressources naturelles (mines de phosphore)	**C** : Secteur de production des biens et services	**D** : Secteurs de recyclage et d'éliminations des polluants
Matrice des outputs résiduels	**E** : Émissions des polluants du phosphore	**F** : Émissions des polluants du secteur de production des biens et services	**G** : Émissions des polluants non recyclables

Source : adapté McDonald , 2005 ; Cordier 2011



Source : Ayres, 1969

Le modèle de Leontieff (1970)

Le modèle intègre les approches de Daly et Ayres, il estime également l'effet de changement de technologie et des mesures politiques sur la variation des prix.

Tableau 4.4.2.4. Le tableau des entrées et sorties de Leontief.

.

Output Industries / Inputs and Pollutants' Output	Industry 1	Industry 2	Pollution Abatement	Final Demand	Total Output
Industry 1	X_{11}	X_{12}	X_{1pa}	Y_1	X_1
Industry 2	X_{21}	X_{22}	X_{2pa}	Y_2	X_2
Physical Output of Pollutant	X_{1p}	X_{2p}	$-X_{pa}$	Y_p	X_p
Primary Inputs	V_1	V_2	V_{pa}	V_y	V
Total Inputs	X_1	X_2	X_{pa}	Y	X

Source : Mc Donald, 2013

Ce modèle considère que la production industrielle se traduit par un prélèvement sur les ressources en amont sur la forme des *inputs*, et par une pollution en aval comme déjà systematisé par Ayres *et al.(*1969). De plus, les coeffients X_{1p} et X_{2p} mésurent les stocks physiques des polluants utilisés en aval. Les activités d'abattement et de dépollution presentent des coûts de réduction des pollutions physiques en $X1_{pa}$ et X_{2pa} à la sortie du processus productif.

Le modèle de Victor (1972)

Ce modèle *produit pour l'industrie* ou *commodities by industries* exprime l'environnement comme un produit (output) proposé par Peter Victor (1972) (tableau 4.4.2.5). Ce modèle montre une vision I/O généralisé pour l'économie tandis qu'il n'a pas utilisé ce type de vision I/O généralisé pour l'estimation de processus naturels, lesquels sont très complexe à modéliser dans une application pratique du modèle input-output.

Tableau 4.4.2.5. Le tableau des entrées et sorties de Victor.

		Economic Commodities	Industries	Final Demand	Totals	Ecological Commodities		
						Land	Air	Water
	Economic Commodities		*A*	*B*	*c*	*G*		
	Industries	*D*			*e*	*F*		
	Primary Inputs		*H*	*K*	*l*			
	Totals	*c'*	*e'*	*o'*	*p*	*q'*		
Ecological Commodities	Land Air Water	*S*	*R*		*t*			

Source : Mc Donald, 2013

Comme nous l'avons déjà vu, à la fin des années 1960 et au début des années 1970, plusieurs économistes, dont Leontief, Daly, Ayres and Knnese ont suggéré des façons d'utiliser des modèles I/O pour analyser divers aspects économiques de la pollution de l'environnement. Par ailleurs Victor (1972) a montré comment les modèles d'entrées-sorties pourraient être adaptés pour inclure les flux de matières à partir de l'économie vers l'environnement en appliquant les principes thémodynamiques. Ce flux ont considéré les ressources naturelles comme des commodities S et R qui ont été utilisés pour les industries dans un marché.

Le modèle de Nakamura (2002) : WIO (Waste Input-Ouput Analysis)

Le WIO génère un autre regard dans l'analyse du cycle de vie (LCA)[61] du déchet et permet également l'expansion de l'approche de Leontieff. Nous pouvons présenter la notion du WIO sous forme matricielle classique de Leontieff comme suit (Takase *et al.* 2005) :

$$\begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \end{bmatrix} = \left(I_{n^1+n^2} - \begin{bmatrix} A_{1,1} & A_{1,2} \\ SG_{.,1} & SG_{.,2} \end{bmatrix} \right)^{-1} x \begin{bmatrix} X_{1,F} \\ SW_{.,F} \end{bmatrix} \qquad (4.4.2.1)$$

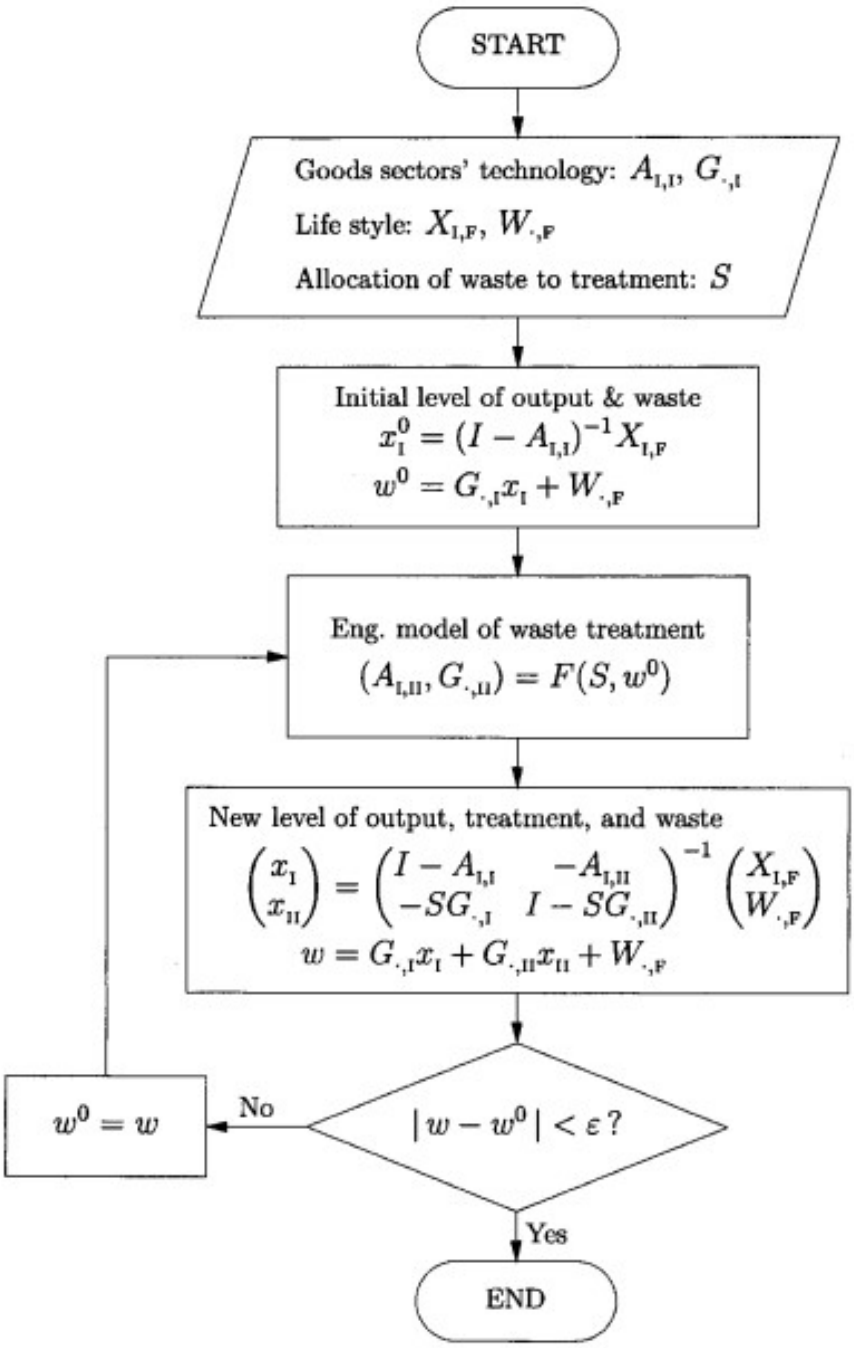
On détermine l'output nécessaire pour satisfaire un niveau donné de demande finale en résolvant ce système par rapport à $\begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \end{bmatrix}$ auxquelles représente les productions dans les secteurs 1 et 2, $I_{n^1+n^2}$ représente la matrice unitaire, la matrice des coefficients techniques est représentée par $\begin{bmatrix} A_{1,1} & A_{1,2} \\ SG_{.,1} & SG_{.,2} \end{bmatrix}$ et le vecteur $\begin{bmatrix} X_{1,F} \\ SW_{.,F} \end{bmatrix}$ représente la demande finale.

Pour présenter le recyclage, le vecteur *S* transforme la production nette du déchet $W_{.,F}$ dans le secteur *i* jusque-là secteur *F* comme un input au secteur $X_{1,F}$, en conséquence duquel le flux $X_{2,F} = SW_{.,F}$ (Takase *et al.* 2005) représente la circularité du processus. Comme les coefficients techniques donnent les quantités d'*input* nécessaires pour produire une unité d'*output*, nous pouvons modifier les quantités d'*input* ainsi que le système de répartition des déchets $G_{.,1}$ et $G_{.,2}$. Les changements de technologie permettent au vecteur *S* de transformer le système de répartition des déchets $G_{.,1}$.

Le modele WIO présenté à travers d'un schema dans la figure 4.4.2.6. Le premier triangle (*Initial level of output and waste*) représente les conditions initiales en ce qui a trait à la technologie de production et de génération de résidus et la demande finale. Le deuxieme traingle (*Eng.model of waste treatment*) montré que les résidus générés seront l'objet de différents traitements. Le troisième triangule (*New level of output, treatment, and waste*) exprimé une nouvelle ronde de production, de génération de résidus et de traitement (on peut trouver plus de renseignement sur autres modèles de traitement des déchets I/O en annexe IV.A).

61 L'analyse du cycle de vie peut être traduit en anglais comme *Life-cycle assessment* (LCA)

Figure 4.4.2.6: Modèle WIO

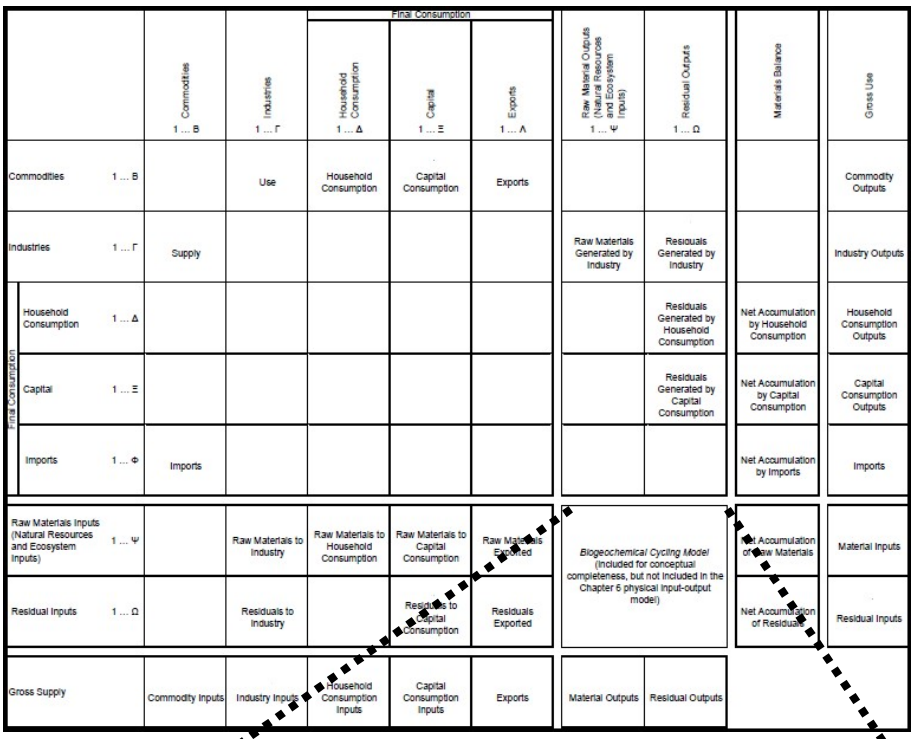


Source : Nakamura *et al.* 2002

Le modèle Input Output didactique

Ce modèle didactique explique le principe du tableau d'entrées sorties physiques (PIOT). Il s'agit d'une matrice appelée *commodities by industry*.

Tableau 4.4.2.7. Tableau «*commodities by industry* dans un PIOT.



Source : Mc Donald *et al.* 2008

Tableau 4.4.2.8 Tableau des composants et des processus pour le cycle biochimique du carbone en Ile-de-France.

Composant\Processus	oxidation of land humus	volcanic action	land plant respiration	tropospheric oxidation of CO	release of CO2	absorption of CO2	production of CO	oxidation of CH4	sorption of CO	production of CH4	land humus formation	land consumption	gross marine production	marine plant respiration	production of CaCO3	marine humus formation	marine consumption	land humus formation	marine humus formation	coal formation	transfer of land humus	oxidation of marine humus	kerogen formation	formation of limestone	weathering of limestone	igneous rock formation
Land humus	7011								-32		-6293									-2	-62					
igneous rock																										
land plant			-18408															-9224	-196							
carbon monoxide				125			9	130	-17																	
hydrogen carbonate																										
carbon dioxide	2777		6218	94	3952	-4300				16	-623							-5								
marine biota							6										-21		-15							
methane								152		37												-152		-152		
land biota										21		-36						-15								
marine plants													-1550	-456	-42	-897	-15									
marine humus																-883					-10		-15	-785		
calcium carbonate															-281										-123	
sedimentary rock																										
coal																										

Dans cette matrice, les colonnes représentent la destination des *inputs* dans les composants et les lignes représentent la production des *outputs* à travers des processus biophysiques du cycle de carbone. Les matrices sont construites pour représenter l'idée que chaque service ou bien de l'environnement produit par un processus de la biosphère devraient être enregistrés simultanément dans une table pour origine et destination.

D'autres flux de matières peuvent également être attendus comme les comptes d'émissions de dioxyde de soufre (SO_2), d'ammoniac (NH_3), de composés organiques volatils non méthaniques (COVNM), de monoxyde de carbone (CO), d'oxydes d'azote (NOx), de métaux lourds, etc., et de gaz à effet de serre (dioxyde de carbone (CO_2)), protoxyde d'azote (N_2O), méthane (CH_4), hydrofluorocarbures (HFC), perfluorocarbures (PFC), hexafluorure de soufre (SF6)] de provenance et à destination de l'environnement et donnent une description très détaillée de ces flux, secteur par secteur (Stahmer *et al.* 1998). De plus, le tableau 4.4.2.9. propose une liste de processus en utilisant le cycle biochimique du carbone en Ile-de-France.

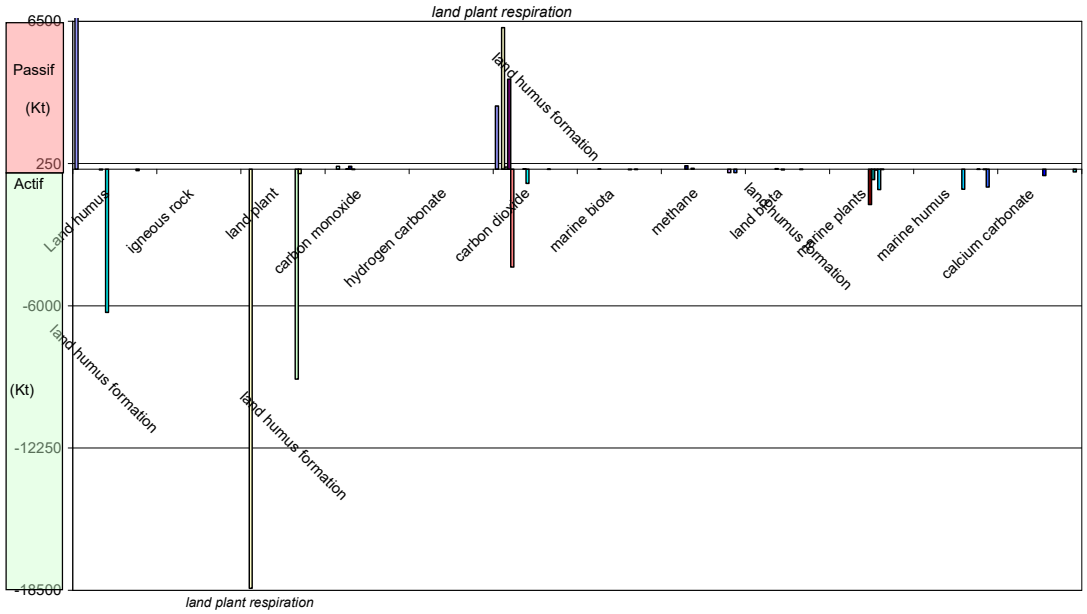
Tableau 4.4.2.9 Cycle du carbone, processus et numéraires en Île-de-France

***Processus**	**description**	**unites**	**monde**	**France**	**Île-de-France**
oxidation of land humus	Biosphère	mil ha	14880	64	1,2
volcanic action	lithosphère 1:1000 années	nd	nd		0,0
land plant respiration	biosphère	mil ha	14880	64	1,2
tropospheric oxidation of CO	geosphère	mil ha	51010	99	1,8
release of CO_2	hydrosphère	mil ha	36130	32	0,6
absorption of CO_2	hydrosphère	mil ha	36130	32	0,6
gross land production	geosphère	EJ	235704	3261	61,1
production of CO	hydrosphère	mil ha	36130	32	0,6
oxidation of CH_4	geosphère	mil ha		99	1,8
sorption of CO	geosphère	mil ha	14880	64	1,2
production of CH_4	geosphère	mil ha	14880	64	1,2
land humus formation	geosphère	mil ha	14880	64	1,2
land consumption	geosphère	mil ha	14880	64	1,2
gross marine production	hydrosphère	mil ha	36130	32	0,6
marine plant respiration	hydrosphère	mil ha	36130	32	0,6
production of $CaCO_3$	hydrosphère	mil ha	36130	32	0,6
marine humus formation	hydrosphère	mil ha	36130	32	0,6
marine consumption	hydrosphère	mil ha	36130	32	0,6
land humus formation	biosphère	mil ha	14880	64	1,2
marine humus formation	hydrosphère	mil ha	36130	32	0,6
coal formation	lithosphère	mil ha	14880	64	1,2
transfer of land humus	biosphère	mil ha	36130	32	0,6
oxidation of marine humus	hydrosphère	mil ha	36130	32	0,6
kerogen formation	Nd	nd	nd	0	0,0
formation of limestone	hydrosphère	mil ha	36130	32	0,6
weathering of limestone	Nd	ha	nd	115860	2 170,0
igneous rock formation	lithosphère	mil ha	14880	64	1,2

Source : L'auteur

La matrice I/O physique qui a été montré dans la figure 4.4.2.8 peut être utilisé pour explore un modèle en utilisant le concept du passif et actif (graphique 4.4.2.10) proposé par Loiret (2012) (cf. chapitre I).

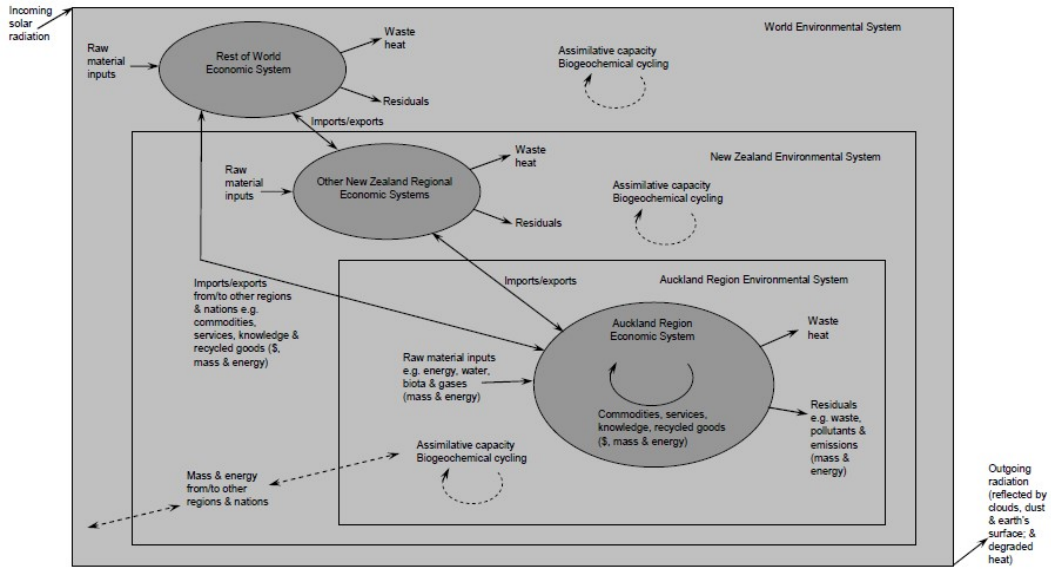
Graphique 4.4.2.10 Cycle du carbone : Actif et Passif en Île-de-France



Source : L'auteur

En outre, le modèle PIOT proposé pour McDonald a été développé de multiples façons au moyen de tableaux entrées-sorties de la région de Auckland en Nouvelle-Zélande, de données sur le traitement des matières résiduelles et d'un modèle d'ingénierie de gestion des matières résiduelles dans le but de montrer l'ensemble des entrées et des sorties biophysiques dans le système.

Figure 4.4.2.A Relations biophysiques entre la région d'Auckland et le reste du monde.



Source : Mc Donald *et al.* 2008

Grâce à la complexité de l'ensemble des relations qui comprend les limites physiques de la région, McDonald propose un cadre d'analyse qui prend en compte les relations au niveau local et global (figure 4.4.2.A).

Ce modèle a été apliqué dans la thèse de Mateo Cordier (2011) pour introduire des secteur de l'environnement dans un tableau I/O classique. La méthode a également été exploré pour mesurer la distance à l'equilibre thermodynamique (indice K) qui a été développé dans la thèse de Richard Loiret (2016) à partir d'un tableau I/O de l'environnement.

4.5. Conclusion du Chapitre 4

De nombreux chercheurs ont exprimé leur accord sur l'idée que l'analyse *input-output* (I/O) dépasse en fait largement les activités de l'auteur Leontief: expliquer la formation de l'analyse I/O entre 1920 et 1950, mais aussi la méthode, a participé à la transformations de la science économique.

Dans cet esprit certains auteurs ont utilisé des secteurs de l'environnement dans le modèle. Cumberland (1966) intègre les secteurs de l'environnement au modèle I/O en utilisant un modèle *industry by industry*. Il ajoute les bénéficies environnementaux en valeur, coûts environnementaux en valeur, coûts de restauration de l'environnement en valeur.

Plus tard, en 1968 Walter Isard puis Peter Victor en 1972 présentent les flux de matière et d'énergie entre le système économique et le système écologique dans un tableau *commodities by industry* . Isard est connu principalement comme le fondateur de la science régionale qui s'intéresse entre autres aux analyses écologiques et environnementales, à la gestion des ressources en utilisant les analyses entrée-sortie.

En 1969, la modèle d'Ayres-Kneese intègre au modèle de Daly dans un tableau *industry by industry* la première loi et la deuxième loi de la thermodynamique et donc, l'élimination des polluants, le recyclage et la conservation de la matière.

Aujourd'hui, le modèle a été élargi, avec par exemple la mesure de flux du déchets dans le *Waste Input-Output Analysis* ou WIO (Nakamura *et al.* 2002), l'application à l'analyse du cycle de vie (Takase *et al.* 2005).

Dans notre étude, l'usage des modèles I/O permet de donner un cadre formel dans l'analyse et les réflexions sur le flux de matière et d'énergie de la biosphère. Dans ce sens, le chapitre 6 présente une typologie de quatre structures I/O du système pour formaliser les relations économiques-physiques.

Le chapitre VII débouche sur l'élaboration et le chiffrage d'une matrice des commodités et de processus en utilisant le modèle d'Isard (1968) et Victor (1972). Il s'agit de quantités des différents biens produits, polluants émis, déchets recyclés et valorisés par les branches à l'occasion d'une consommation intermédiaire. Le chapitre IX est consacré entre autres à l'analyse de ces matrices et des indicateurs comme le PIOT et le WIO par une méthode technico-économique. Il est aussi l'occasion de tester la capacité prévisionnelle de la méthode I/O pour donner un cadre plus dynamique applicable à l'économie circulaire.

5. LA PRODUCTION JOINTE APPLIQUEE AU PARCOURS DE MOLECULES DE LA BIOSPHERE

LE BUT DE CETTE PARTIE N'EST PAS SEULEMENT DE REPRESENTER LES PROCESSUS DE PRODUCTION mais également de voir en quoi l'approche de Sraffa peut être utile pour les enjeux de l'économie écologique, en tenant compte à cet égard que Sraffa ne cherche pas à représenter directement les cycles biophysiques. Par contre, il a représenté les relations entre les commodités à l'intérieur d'un système de régulation qui peut être représenté à travers un système de valeur en échange (O'Connor, 1993) et celui-ci a été appelé pour Sraffa comme le système de marchandises. Dans ce système, les commodités deviennent des marchandises quand les acteurs de l'économie leur donnent un prix. Le prix pour Sraffa répresente un signal de la transaction la marchandise n'est que le support physique de la transaction. Le prix est une propriété du système que l'on peut appeler prix relatif ou valeur d'echange relative à un autre bien. Autrement dit, ce prix caractérise la marchandise dans une relation systémique avec d'autres marchandises. Le système de prix n'est donc pas une représentation *universelle*, par contre, il fluctue avec les variations des relations entre les marchandises.

5.1. Prise de perspective de la histoire de la pensée économique: production jointe

Dans cette partie on se propose de réaliser une réflexion de fond autour des systèmes de valeur économiques et de certains aspects liés à leur mise en œuvre pratique, par exemple la caractérisation d'une économie circulaire. Le défi est d'insérer une logique d'échanges circulaires durables au sein de la théorie de la valeur de Marx, Ricardo et Sraffa. La théorie de la valeur s'appuie sur une prise en compte détaillé des échanges inter-industries et des quantités de travail.

Nous pouvons ainsi classifier notre système économique actuel comme un système de consommation de biens et de services ; tel n'était pas véritablement le cas dans les sociétés primitives composées de chasseurs-cueilleurs. L'homme progressivement a commencé à transformer la valeur d'usage de ses différents aliments en valeur d'échange, ce type de processus a été illustré par Marx dans le livre I du *Capital*.

Les critiques adressées à la théorie de la valeur de Marx proviennent de théoriciens appartenant à divers courants de pensée économique. La plupart d'entre eux ont essayé de prouver que ses arguments de Marx ne sont pas complètement logiques. Ainsi, les Néoricardiens, qui ont cherché à développer le travail de Piero Sraffa, ont peut-être été les plus catégoriques à ce sujet. Parmi eux, Ian Steedman apparaît comme l'auteur qui a exposé le plus clairement les faiblesses fondamentales des écrits de Marx dans son livre *Marx après Sraffa* [62] (Steedman, 1977). Mais il est cependant possible d'étendre la théorie de la valeur de Marx vers le domaine de l'économie de l'environnement, sur la base des théories

[62] En anglais, « Marx after Sraffa » de l'année 1977.

d'Abraham-Frois et Berrebi (Abraham-Frois *et al.* 1979), Pasinetti (Pasinetti, 1980), Salvadori et Steedman (Salvadori *et al.* 1990) qui permettent la construction d'un parcours de croissance équilibrée dans une économie dépendante des ressources épuisables.

Dans cette logique systémique, nous devons contrôler les impacts éventuels de l'épuisement des ressources naturelles, tout en contribuant à accroître la sécurité des approvisionnements des ressources, à créer des emplois régionaux à tous niveaux de compétences et à réduire les émissions de gaz à effet de serre, surtout au niveau des cycles courts de ré-utilisation, réparation et prolongation de la durée de vie. De même, un système fiscal conçu pour favoriser le développement durable qui considère le travail comme une ressource renouvelable et par conséquent non imposable, constitue un puissant levier permettant d'accélérer le développement d'un système circulaire. Ceci a pour corollaire un impact positif sur les trois piliers du développement durable que sont l'économie, l'environnement et l'équilibre social grâce à l'emploi. Nous voulons dans cette partie, en utilisant les principaux modèles économiques de Marx, Ricardo, Sraffa, établir un cadre conceptuel adapté à une logique circulaire.

Cette approche *classique* se traduit d'une part, dans une approche reproductive de la production et d'échange de biens et de services. D'autre part, à la préoccupation concernant l'accumulation et la distribution de la richesse et d'autres aspects essentiels de l'analyse, en considérant la concurrence comme une situation de marché caractérisée par une entrée et un sortie des acteurs et des marchandises, ce qui implique une tendance à une égalisation des taux de profits sectoriels dans le long terme. Dans ce contexte, il existe un certain *déséquilibre* entre le nombre de travaux et de publications effectués dans le cadre de la production simple, par rapport aux productions jointes illustrées par les travaux de Von Neumann et Sraffa. D'une manière générale, nous pouvons dire que l'analyse économique classique a consacré beaucoup plus d'efforts pour assurer le fondement théorique des modèles de production simples.

Certains auteurs comme (Kurz, 1986) se demandent si ce *déséquilibre* ne serait pas basé sur deux causes fondamentales :

- la plus grande importance empirique des modèles de production simple ;
- la croyance que les résultats obtenus dans les modèles de production simples sont facilement généralisables au cas de production jointe.

En ce qui concerne la deuxième cause, il faut dire que les différentes études théoriques sérieuses montrent qu'il a été difficile de généraliser les résultats en utilisant seulement la production jointe (Steedman 1982, 1985 ; Woods, 1984).

D'autre part, il est vrai que les études empiriques ont porté sur la production simple grâce à l'utilisation de tableaux d'entrées-sorties à travers la modélisation empirique de la production. Sur ce point, on peut se demander s'il s'agit du symptôme de l'absence d'un support théorique cohérent pour construire des modèles empiriques de la production jointe (Schefold, 1985).

Indépendamment des considérations précédentes, il existe un certain nombre de raisons qui soutiennent l'intérêt de mise en place d'études sur les modèles de production jointe.

Premièrement, la plupart des processus de production réels sont exploités sous la production jointe.

Deuxièmement, dans l'analyse correcte de certains problèmes, il faut une expression en termes de production jointe. Par exemple dans les études sur l'élimination des déchets ou dans le traitement du

capital fixe, comme les machines, celles-ci peuvent être considérées en même temps comme des facteurs productifs et comme des produits, elles peuvent contribuer à la production d'autres marchandises dans la période suivante.

Nous avons défini l'importance d'un cadre théorique adéquat en termes de production jointe. Il est désormais pertinent de mentionner que dans les modèles classiques sectoriels deux alternatives existent, les modèles de type Von Neumann, et l'optique Sraffa-Leontief. Bien que conceptuellement distincts, ces deux modèles ont une équivalence mathématique (Schefold, 1980) et sous certaines conditions, fournissent des solutions identiques. Cependant, le modèle de Von Neumann montre certaines limites.

En effet, l'approche mathématique utilise un programmation linéaire semi-positif, qui fournit toujours des solutions pour les prix. Il est pertinent de mentionner les approches concernant l'analyse et l'élimination des déchets, lesquelles demandent la capacité d'obtenir des prix négatifs, qui sont interprétés comme des coûts d'élimination. Ses limites nous conduisent à choisir le cadre de référence du modèle proposé par Sraffa (1960).

Une fois placé dans le contexte du modèle de Sraffa, il est surprenant de noter la différence qualitative et quantitative dans les modèles de développement théoriques entre la production simple et la production jointe.

Laissant de côté les problèmes structurels, qui seront analysés par la suite, des questions peuvent immédiatement être posées:

- Pourquoi étudier le cas particulier, plutôt que le cas général?
- Pourquoi n'y a-t-il pas de conditions qui assurent la viabilité d'un modèle de production joint?
- Comment la productivité est elle mesurée de même que le taux profil dans un modèle de production jointe par rapport au modèle de production simple?
- Pourquoi est-il difficile de trouver et de construire des données empiriques dans un modèle de production jointe?

Du point de vue de la production, le modèle de production simple a été largement étudié. Pour faire découvrir cette approche, il est utile de procéder à une étude comparative détaillée des deux systèmes, toujours dans le cadre du modèle choisi pour Sraffa. Tous les deux conduisent à d'équations linéaires, mais dans le cas d'un système de production simple, la matrice est carrée et il existe une relation entre produits et processus de production. De plus, le théorème de Perron-Frobenius[63] est utile dans la détermination du taux de profit.

Par ailleurs, les marchandises ne sont plus associées à un secteur productif unique et la production d'un produit peut se faire par différents procédés. Cependant, il n'existe aucune garantie, d'un côté de satisfaire la demande finale, et d'un autre côté d'avoir l'existence de prix d'équilibre positifs par une technique donnée.

[63] Le théorème de Perron-Frobenius dit qu'est, **A** une matrice indécomposable de format k × k et **I** le vecteur ligne des besoins en travail direct la matrice (I – A) est inversible et (I – A)– 1 > 0 (Abraham-Frois, 2001).

Cependant, il existe certaines similitudes entre le système de production simple et jointe, qui est caractérisé par quelques hypothèses sur les existences des intrants utilisés dans la production et les rendements d'échelle constants. Tels modèles économiques de production peuvent être définis linéairement comme suit :

$$Bx = Ax + d \tag{5.1.1}$$

$$pB = (1+r)pA + wa \tag{5.1.2}$$

L'équation représente un système de quantités (A et B) et du prix (p) dans lequel on introduit les notions de rentabilité (r). Le salaire est également représenté par le taux de salaire (w) et (a) le vecteur-colonne d'ordre n presente les quantités de travail direct incorporées par unité de bien produit (ces quantités sont définies en heures de travail). Cette approche utilise une économie fermée sans secteur public qui produit n marchandises en utilisant du travail homogène dans les secteurs productifs m, lesquels suivent les hypothèses suivantes:

1. Toutes les marchandises ont la même période de production et utilisent des entrées au début de la période.

2. Le travail homogène est la seule entrée de production, sa participation est nécessaire à tous les processus et on considère les conditions de concurrence sur le marché du travail à travers l'hypothèse de salaires uniformes.

3. Il existe des rendements constants d'échelle.

4. Tout nombre réel positif peut représenter une certaine quantité de marchandises, ce qui suggère la divisibilité des biens.

5. Il existe une seule technique disponible pour chacun des secteurs productifs

En posant les hypothèses sur les intrants (*input*) nécessaires pour le secteur et les sorties (*output*), le système de production peut être présenté par les équations suivantes :

$$\begin{aligned} a_j &= (a_{1j}, a_{j2}, ..., a_{nj}) \\ b_j &= (b_{1j}, b_{j2}, ..., b_{nj}) \\ a_j &\in \Re \end{aligned} \tag{5.1.3}$$

Où $a_{ij} \geq 0$, est la quantité de produits i utilisés comme intrant dans le processus j, $a_{1j} > 0$ représente la quantité de travail homogène et b_{ij} représente la quantité de marchandises j produit par ce processus.

L'ensemble des méthodes de production défini le système économique, qui est décrit par (A, a, B) où $A = (a_{ij})_{nm}$ représente le vecteur des exigences en entrée (*input*) et $B = (b_{ij})_{nm}$ représente la matrice des sorties (*output*) et de toute évidence, les matrices A et B sont semi-positives, et le vecteur a est strictement positif. , Il y a un certain nombre de contraintes qu'il faut préciser par rapport au système de production (Douguet *et al.* 2008):

- Pour que le système soit reproductif, chaque produit doit être produit au moins dans un secteur, ce qui peut être défini comme suit:

$$b_i = (b_{i1}, b_{i2}, \ldots\ldots b_{im}) \neq 0 \text{ pour } i = 1,2,\ldots\ldots\ldots\ldots, n$$

- Chaque processus qui utilise un intrant de base en tant que moyen de production, à savoir :

$$a_j = (a_{1j}, a_{2j}, \ldots\ldots, a_{nj}) \neq 0 \text{ pour } j = 1,2,\ldots\ldots\ldots\ldots, n$$

- Chaque secteur produit un bien, donc :

$$b_j = (b_{1j}, b_{2j}, \ldots\ldots, b_{mj}) \neq 0 \text{ pour } j = 1,2,\ldots\ldots\ldots\ldots, m$$

Ensuite, la notion rentabilité peut être représenté par le système de prix comme :

$$rpA + wa = v \tag{5.1.3}$$

Egalement, cette égalité peut être exprimé comme :

$$pB = (1 + r)pa + wa \tag{5.1.4}$$

Où $r \geq 0$ représente le taux de profit et $w \geq 0$ le taux de salaire unitaire. Egalement, le modèle peut être caracterisé si :

- Le système est productif s'il y a un niveau d'activité $x \geq 0$ tel que : $Bx > Ax$, c'est-à-dire que le système est capable de produit des outputs dans tous les biens.

- Le modèle économique est rentable s'il possède des prix tels que $p \geq 0$ et tels que : $pB > pA$, c'est-à-dire que la variation de la valeur ajoutée en chaque secteur reste positive.

- Le modèle économique est durable s'il être capable de soutenir n'importe quelle la demande finale *d*, c'est-à-dire que $\forall d \geq 0$ il existe un $x \geq 0$ tel qu' $Bx = Ax + d$

- Le système est de production simple si chaque secteur de production fabrique un seul bien, et chaque produit est fabriqué par un seul secteur.

5.1.1. Le travail et la terre dans un modèle de production jointe : représentation Marxiste et Ricardienne.

Après cette présentation théorique de la production jointe, cette partie se focalisera sur une représentation Marxiste et Ricardienne du travail et de la terre. L'absence de réponses, même dans des cas très spécifiques, peut donner une idée du vide qui existe sur le sujet de production jointe. En ce sens, nous pourrions supposer que chaque secteur produit plus d'un produit ou d'un bien, mais qu'en termes de sortie nette, chaque processus est associé à un seul bien : dans ce cas, on peut dire qu'il y a production simple, mais il n'y a pas de conditions garantissant l'existence de prix d'équilibre et des taux de profit positifs. Par consequence, il nous semble nécessaire d'exprimer l'évolution des différentes théories de la valeur et leurs limitations par rapport à la notion d'appropriation de valeur et le concept de transformation.

La pensée économique classique est caractérisée par deux principaux représentants, nous nous référons à Adam Smith (1723-1790) et à David Ricardo (1772-1823) : ils ont vécu la montée du capitalisme industriel anglais dans sa première phase, par rapport aux éléments survivants du monde féodal et mercantiliste. Leurs héritiers du milieu du XIXe siècle sont divisés par les critiques néoclassiques et socialistes du capitalisme à travers l'approche de Marx.

Pour Smith, dans son ouvrage *La richesse des nations* publié en 1776, la principale incitation à l'activité économique est la recherche l'intérêt individuel. Pour lui, il n'existe pas d'humanisme, mais l'amour de soi-même, de sorte que chaque individu agit d'une manière qui peut le mieux répondre à ses propres besoins. L'individu ne pense qu'à son propre gain. Il est conduit par une *main invisible* à remplir une fin qui n'entre nullement dans ses intentions. Tout en ne cherchant que son intérêt personnel, il travaille souvent d'une manière bien plus efficace pour l'intérêt de la société. La fixation des prix, les recettes sur les salaires et la distribution des profits sont très importants dans son approche. La théorie de la valeur est plus basée sur la quantité de travail nécessaire à la production et les politiques qui s'appliquent pour encourager et promouvoir le progrès économique et la prospérité.

Les contributions de Ricardo[64] à la pensée économique classique peuvent être résumées en trois points principaux. Les réflexions sur la théorie de la valeur, sur le loyer de la terre et sur le commerce international. En résumé, Ricardo accorde une place importante au travail, qui se compose de la somme des travailleurs et des instruments utilisés par ces derniers.

La théorie de Ricardo montre qu'il existe différentes qualités de terre et que le taux de profit est influencé par la distance par rapport au centre de la consommation, par la qualité des sols et par la notion de rente différentielle qui apparait alors sur les terres les mieux placées et/ou les plus fertiles pour les propriétaires des ressources.

[64] Sa carrière fut différente de celle de Smith. Il fut agent de change, marchand et parlementaire. Son travail le plus important fut *Principes d'économie politique et de la fiscalité* en 1817.

La théorie ricardienne présente les visions Marxistes et Ricardiennes d'un système économique simplifié, elle peut être formalisée par le système comme suit (Passineti, 1985):

$$X = f(N) \tag{5.1.1.1}$$

Avec les propriétés

$$\begin{aligned} &f(0) \geq 0 \\ &f'(1) \geq \tilde{x} \\ &f''(N) < 0 \\ &R = f(N) - Nf'(N) \\ &W = Nx \\ &K = W \\ &P = X - R - W \end{aligned} \tag{5.1.1.2}$$

Où X désigne la quantité de biens produits chaque année (cf. équation 5.1.1.2), N le nombre de travailleurs employés, R les rentes totales, W les salaires totaux, K le capital circulant, P les profits, x le salaire unitaire.

Dans un modèle à deux secteurs, la théorie peut être résumée comme suit :

$$X = f(N_1) \tag{5.1.1.3}$$

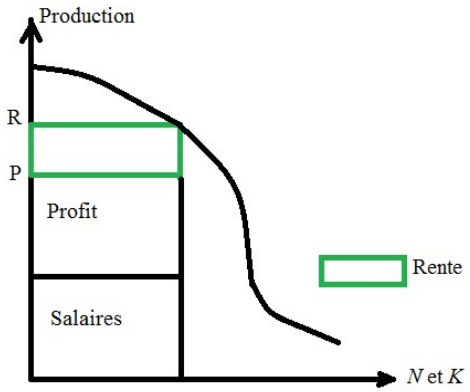
Ensuite, le système présente les propriétés suivant :

$$\begin{aligned} &f(0) \geq 0 \\ &f'(1) \geq \tilde{x} \\ &f''(N_1) < 0 \\ &R = f(N_1) - N_1 f'(N_1) \\ &W = Nx \\ &K = W \\ &P_1 = X_1 - R - N_1 x \\ &x = \tilde{x} \\ &K = \overline{K} \end{aligned} \tag{5.1.1.4}$$

Où $\overline{K}$ représentent les quantités disponibles du capital.

Le graphique suivant montre les facteurs de production comme la main d'œuvre (N) ou le capital (K), lesquels sont complémentaires et déterminent le niveau de la production. Egalement, la rente prélevée lorsque les quantité de facteurs N ou K est égal à la différence entre le rendement moyen et le rendement marginal du facteur (soit R et P).

Graphique 5.1.1.1. La quantité de travail ou de terres : Les facteurs de production complémentaires



Source. L'auteur

Pour illustrer un système économique simplifié d'un secteur, la théorie de Marx représente la valeur des marchandises comme la somme entre la quantité de travail c nécessaire pour reconstituer l'ensemble des marchandises et des machines utilisées dans le processus de production, et la quantité de travail v nécessaire pour le remplacement des fonds de biens-salaires avancés pour subvenir aux besoins de la main-d'œuvre et la plus-value s, où la quantité de travail incorporée dans les marchandises (Pasinetti ,1985).

Ensuite pour assurer la reproduction du système, on assume :

$$\begin{aligned} c_1 + v_1 + s_1 &= c_1 + c_2 + c_3 \\ c_2 + v_2 + s_2 &= v_1 + v_2 + v_3 \\ c_3 + v_3 + s_3 &= s_1 + s_2 + s_3 \end{aligned} \tag{5.1.1.5}$$

Après nous pouvons analyser le rapport entre la plus-value[65] et le capital variable[66], que Marx appelle taux de plus-value, désigné par σ dans l'égalité (5.1.1.6):

$$\sigma = \frac{s}{v} \tag{5.1.1.6}$$

Le taux de plus-value devra être le même dans tous les secteurs de l'économie, donc :

$$\sigma = \frac{s_1}{v_1} = \frac{s_2}{v_2} = \frac{s_3}{v_3} \tag{5.1.1.7}$$

Cette égalité dans tous les secteurs de l'économie n'est jamais réalisée dans un système capitaliste, mais pour avoir une solution à cette controverse Marx a reformulé cette égalité comme suit :

[65] Marx appelle plus-value l'excédent produit par un travailleur au-delà de ce qui est nécessaire à sa subsistance (Passineti,1985).
[66] Marx appelle capital variable le fonds de biens-salaires avancés pour subvenir aux besoins de la main-d'œuvre et de la plus-value (Passineti,1985).

$$\Pi_i = \frac{s_i}{c_i + v_i} \quad i=1,2,3 \tag{5.1.1.8}$$

Le Π définissant les taux de profit (cf. équation 5.1.1.8) comme le rapport entre la plus-value et la quantité totale du capital dans chaque secteur i de l'économie compose pour la quantité de travail $\boldsymbol{c}$ et le capital variable $\boldsymbol{v}$. Ensuite Marx a redéfini le Π comme suit :

$$\Pi_i = \frac{\sigma}{1 + y_i} \tag{5.1.1.9}$$

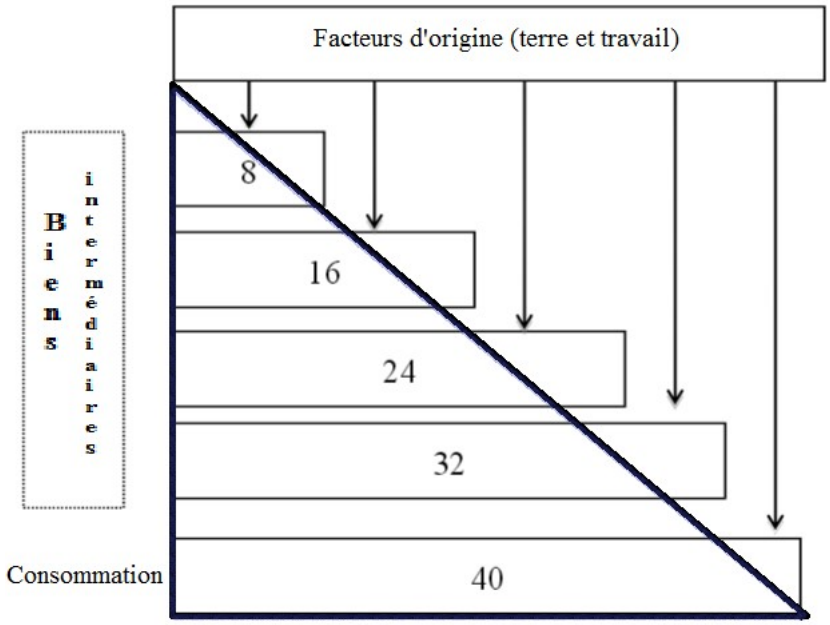
Dans laquelle Π présente le même taux de profit, mais à travers la relation entre le taux de plus-value désigné par σ et la composition organique du capital[67] définie par y_i (cf. équation 5.1.1.9), laquelle dépend de sa composition technique. De plus, la complexification des techniques et l'automatisation tendent à augmenter la composition organique du capital.

Jusqu'à ce point de discussion, le sujet d'étude a été consacré à la production. À partir de 1870, l'objet change fondamentalement et se dirige vers l'étude du comportement rationnel du consommateur (Passineti ,1985). Le point de départ de cette pensée marginaliste est associé à l'apparition simultanée et indépendante de trois ouvrages : *The Theory of Political Economy* de William Stanley Jevons (1888), *Grundzätze der Volkswirthschaftslehre*[68] de Carl Menger (1871), tandis que paraissent également les éléments d'économie politique pure de Léon Walras(1874).

Les éléments d'économie pure de Walras ont permis de franchir une étape importante dans le développement de l'économie en tant que science. Walras commence tout d'abord la construction de sa théorie générale de l'échange, avant d'ajouter les autres composantes majeures du modèle : la théorie de la production et de la consommation ; la théorie du capital et de l'investissement; et enfin, la théorie de la monnaie en 1886. Il pense que son modèle décrit la façon par laquelle les marchés concurrentiels arrivent à un certain équilibre, qu'il est parfaitement concurrentiel et est une approximation raisonnable de l'économie de son temps. Pour mener cet objectif Walras étudie la question de la rareté ou de l'utilité marginale dans la théorie de l'équilibre général.

[67] La composition organique du capital peut être traduit en anglais comme The organic composition of capital (OCC).
[68] Grundzätze der Volkswirthschaftslehre peut être traduit en française comme les Principes d'économie politique.

Tableau 5.1.1.2. Facteurs d'origine (terre et travail) et biens intermédiaires



Source: Adapté de Akhabbar *et al.* 2010.

Par rapport à l'enjeu de Walras, l'approche marginaliste autrichienne est plus proche de la théorie de la production. Pour illustrer l'approche marginaliste, le tableau 5.1.1.2 présente le processus de transformation des facteurs d'origine (terre et travail) du point de vue du marginalisme autrichien et la manière dont ils sont utilisés dans un premier temps pour produire des biens intermédiaires (valeur : 8). Ces premiers biens intermédiaires sont ensuite utilisés pour produire d'autres biens intermédiaires (valeur : 16) et ainsi de suite, jusqu'à ce que les biens de consommation soient produits. Le triangle montre que les biens de consommation sont les plus éloignés des facteurs d'origine. En ce sens, on peut les caractériser selon leurs distances avec les facteurs de production d'origine. Ce type de processus de transformation a été déjà étudié au travers de l'approche de Marx sur la composition organique du capital et plus récemment par Böhm-Bawerk (Böhm-Bawerk, 1896), Bortkiewicz (Bortkiewicz, 1906)[69], Seton (Seton, 1957), Samuelson (Samuelson, 1971), Dmitriev (Dmitriev, 1974), Moroshima (Moroshima, 1974), Steedman (Steedman, 1992), Marioli (Marioli, 2006), etc.

La contribution de Ladilaus Von Bortkiewicz :

L. Von Bortkiewicz était un ricardien et s'est efforcé de défendre l'attaque systématique contre Marx concernant son traitement de la valeur et du prix, et sa *solution* au problème de la transformation. Ainsi, Bortkiewicz est généralement présenté comme l'économiste qui a résolu de façon définitive le problème

[69] La première version de l'ouvrage se trouve dans « Archiv fur Sozialwissenschaft und Sozialpolitik » qui a été écrite entre 1906 et 1907.

dit de la *transformation des valeurs en prix de production* . Dans le tome 1 du Capital de Marx, il était supposé que tous les produits sont vendus suivant leurs valeurs.

Le modèle de Bortkiewicz pose quelques hypothèses (Van Bambeke, 2009) :

La première indique que l'ensemble du capital constant est utilisé à chaque période de production, autrement dit que le capital fixe n'est pas pris en considération.

La deuxième montre que l'économie est structurée à partir des moyens de production, des moyens de consommation des travailleurs et des moyens de consommation des capitalistes.

Dans la troisième hypothèse l'économie est considérée comme stationnaire.

Par ailleurs l'or, marchandise et monnaie, est produit pour les moyens de consommation des capitalistes.

Enfin, le taux d'exploitation est identique pour les moyens de production, les moyens de consommation des travailleurs et les moyens de consommation des capitalistes.

A partir de ces hypothèses, Bortkiewicz a été le premier à donner une solution logique au problème posé par Marx par rapport au traitement du capital. En effet, Marx transforme en prix tous les profits de chaque secteur de l'économie en utilisant $\boldsymbol{c}$ (quantité de travail), $\boldsymbol{v}$ (capital variable) et $\boldsymbol{s}$ (plus-value) dans le système économique simplifié suivant :

$$\begin{aligned} c_1 + v_1 + s_1 &= c_1 + c_2 + c_3 \\ c_2 + v_2 + s_2 &= v_1 + v_2 + v_3 \\ c_3 + v_3 + s_3 &= s_1 + s_2 + s_3 \end{aligned} \tag{5.1.1.10}$$

Nous définissons le taux de profit déjà exprime dans la dernière section comme Π en (5.1.1.11) :

$$\Pi_i = \frac{s_i}{c_i + v_i} \tag{5.1.1.11}$$

Cette solution proposée par Marx a été critiquée parce qu'il ne séparer pas le capital variable du capital constant dans le processus de transformation. Donc nous pouvons récrire le système de Marx comme :

$$\begin{aligned} (1+\rho)(c_1 x + v_1 y) &= (c_1 + c_2 + c_3)x \\ (1+\rho)(c_2 x + v_2 y) &= (v_1 + v_2 + v_3)y \\ (1+\rho)(c_3 x + v_3 y) &= (s_1 + s_2 + s_3)z \end{aligned} \tag{5.1.1.12}$$

Nous désignons ρ comme le taux de profit (cf. équation 5.1.1.12), en ce sens, nous avons trois équations et quatre inconnues. Ensuite il y adeux solutions pour ce problème. D'un côté, nous pouvons poser une variable égale à 1 (ce qui élimine une variable), d'un autre côté nous pouvons introduire une autre équation comme le fait Sraffa pour avoir des solutions pour son modèle. Nous utilisons le rapport entre l'unité de prix et l'unité de valeur z égale à 1. Finalement, nous pouvons réécrire le système de trois équations et trois inconnues pour trouver ρ (Van Bambeke, 2009).

L'autre regard du problème de transformation : Morishima et Samuelson

Après cette présentation du problème de transformation de Von Bortkiewicz, cette partie se focalisera sur un autre regard au problème de transformation à partir des approches de Morishima et Samuelson. Tout d'abord, à partir des travaux de Morishima (Morishima, 1974) il semble possible de préciser les conditions dans lesquelles le traitement de la valeur et du prix de production est réalisable.

En ce sens, l'approche de Morishima dans son article de 1974 montre deux notions de la valeur du capital, la première exprime la quantité de temps utilisé pour la fabrication d'un bien, laquelle est égale à la quantité de *travail incorporé* [70], c'est-à-dire à la quantité de *travail indirect* et à la quantité de *travail direct* utilisée dans la fabrication du bien. Dans ce sens λ_1 est la valeur d'un facteur productif, par exemple le maïs, en termes de la quantité du temps utilise pour sa production, donc $a_{11}\lambda_1$ est le temps utilisé pour la production de maïs, $a_{21}\lambda_1$ est le temps utilisé pour la production d'engrais et T_1 est le *travail direct* utilisé dans la culture du maïs.

$$\lambda_1 = a_{11}\lambda_1 + a_{21}\lambda_2 + T_1 \tag{5.1.1.13}$$

Morishima a donné une autre notion de la valeur du capital : il le définit comme le temps du *travail socialement nécessaire* [71] pour produire un bien,. Le temps de travail socialement nécessaire pour produire une unité de maïs est alors égal au temps nécessaire pour produire le maïs plus l'intrant additionnel (l'engrais), nous pouvons exprimé cette égalité comme suit :

$$u_1 = T_1 q_1 + T_2 q_2 \tag{5.1.1.14}$$

De plus, les heures de travail utilisées pour produire le maïs sont représentés par $T_1 q_1$ et $T_2 q_2$ (cf. équation 5.1.1.14), ces expressions représentent les heures de travail dans l'industrie des engrais, lesquelles sont utilisées pour produire le bien u_1, lequel représente la valeur du maïs en utilisant le temps comme numéraire.

Morishima, après avoir présenté ces deux notions de valeur, montre qu'il existe une dualité entre le système de détermination de valeur au travers du λ et le système de détermination de valeur au travers du u comme le travail socialement nécessaire (Morishima, 1974).

Pour formaliser le problème de la transformation Samuelson a ainsi exprimé la technologie physique de production de manière mathématique. L'économie discipline principalement littéraire jusqu'au milieu du vingtième siècle, est alors devenue un domaine de savoir hautement mathématisé, formalisé et axiomatisé. Samuelson est l'un des principaux architectes de cette transformation, commencée dès le début de sa carrière avec sa thèse de doctorat intitulée *Les fondements de l'analyse économique*[72]. Son

[70] La valeur d'un bien est fonction du *travail incorporé*, qui réunit à la fois le travail direct c'est-à-dire le temps de travail et l'habileté de l'ouvrier – et le « travail indirect » – contenu dans les machines, les outils, les bâtiments indispensables à la production. La définition peut être trouve sur le dictionnaire Larousse sur le site : http://www.larousse.fr (site consulté le 1 septembre 2015).

[71] La définition de temps de travail socialement nécessaire est la quantité de temps de travail exécuté par un ouvrier de la compétence et de la productivité moyenne, selon Marx, il correspond à une fraction du travailler-temps de la société (Mandel, 1975).

[72] La thèse de doctorat de Paul A. Samuelson fut soutenue en 1941 sous le titre *Foundations of Analytic Economics*.

travail est un bon exemple de la montée d'une jeune génération d'économistes qui appliquent les techniques mathématiques récentes.

Ce transformation peut être formalisé pour les équations suivantes :

$$\begin{aligned} a_1 K + a_2 Y &= T \\ b_1 K + b_2 Y &= K \end{aligned} \qquad (5.1.1.15)$$

Produire une unité de bien Y on utilise ensuite a_2 unités de travail (T) et b_2 unités du capital (K), et a_1 unités de travail (T) et b_1 unités du capital (K) pour produire une unité de K. La description de la technologie utilise ρ comme le taux de profit de l'approche de Von Bortkiewicz, ce qui nous permet d'obtenir (p_1 / s)et (p_2 / s)en (5.1.1.16) :

$$\begin{aligned} \frac{p_1}{s} &= \frac{a_1(1+\rho)}{1-b_1(1+\rho)} \\ \frac{p_2}{s} &= \frac{a_2(1+\rho)\left[1-b_1(1+\rho)\right]+a_1(1+\rho)b_2(1+\rho)}{1-b_1(1+\rho)} \end{aligned} \qquad (5.1.1.16)$$

En conséquence, Samuelson résout le problème pour obtenir les prix relatifs p_1 et p_2 à partir des coefficients technologiques, en supposant que le salaire s et le taux de profit ρ comme variables exogènes (Samuelson, 1957).

Finalement, Morishima et Samuelson utilisent des systèmes de valeur, des systèmes de prix et des relations physiques de type *input-output*. Par contre, Morishima, contrairement à Samuelson, utilise en production conjointe les systèmes de valeur et les systèmes de prix (Morishima, 1974). Dans ce sens et plus récemment, concernant les interrogations sur la théorie de la valeur et sur la théorie de la monnaie, certains membres de la théorie de la Régulation (TR) se sont distingués en critiquant tout recours à une théorie de la valeur et en s'intéressant plutôt aux fondements sociaux de la monnaie (Aglietta *et al.* 2002). Cette position se fonde sur l'idée d'un choix nécessaire entre théorie de la monnaie et théorie de la valeur. À l'opposé, les marxistes ont tenté de défendre la théorie de la valeur travail (LTV), en se focalisant particulièrement sur le problème de la transformation.

5.2. De la production jointe à l'économie politique Sraffiane.

Comme déjà décrit dans la section précédente, une représentation abstraite des relations entre les marchandises à l'intérieur d'un système de régulation a été proposé pour Sraffa. Il ne cherche pas représenter directement les cycles biophysiques, mais il considère que ce système peut être l'expression des relations fondamentalement asymétriques[73] entre la biosphère et l'économie. Il n'est pas logique de

[73] La définition d'asymetrie sera discutée au chapitre VI. Elle est considerée cohérente avec la notion porte par Michael Kleinod (2017) pp. 35-45.

proposer un système de prix qui combine des commodités de l'économie et des services écosystémiques, de façon à intégrer des secteurs de l'économie qui ont été externalisés. Dans ce cadre, il est discutable d'internaliser des secteurs de la biosphère comme des services écosystémiques qui ont été systématiquement hors de l'économie. En effet, le fonctionnement du système de valeur profite ou parasite la biosphère dans le sens de Vernadsky (1997). De plus, les concepts de système de valeur Sraffienne permettent d'exprimer cette asymétrie entre la biosphère et l'économie. Lequel peut être considéré comme une démarche d'appropriation de l'environnement, comme cela a été décrit dans le livre *Is Capitalism sustainable?* (O'Connor, 1994).

L'appropriation dépendra du processus de négociation dynamique des frontières qui considère les étapes suivantes :

1. L'appropriation de la nature pour *nourrir* le capital dont l'internalisation au système de valeur.

2. Apres épuisement des ressources, les déchets sont jetés hors du système avec l'externalisation et l'élargissement des frontières de l'exploitation (Moore, 2015).

Dans le processus de négociation, nous *instrumentalisons*[74] un processus qui a été autonome dans la nature. Cette instrumentalisation peut être démontré à travers le système de valeur exprimé pour Sraffa (Sraffa, 1960), comme l'ont proposé O'Connor et Perrings (Perrings 1987; O'Connor 1993). Dans cette approche, il existe une production jointe qui utilise des processus interdépendants au travers d'un numéraire.

Citons quelques passages du rapport de Douguet *et al.* (2008), nous pouvons caractériser le modèle comme:

> *" (1) Le système du modèle est constitué d'un ensemble de processus de production indépendants, qui comprend à la fois l'économie en question et son environnement terrestre. L'activité de production intervient au cours de périodes de temps discret désignées par l'indice T. Il y a une production jointe et chaque processus qui utilise au moins un input.*
>
> *(2) On suppose, pour des raisons de commodité algébrique, que le nombre total de processus, N, est égal au nombre total de ressources matérielles distinctes.*
>
> *(3) Les inputs et outputs en ressources matérielles sont, au cours de chaque période de production T, alloués en accord avec des technologies spécifiques données. La technologie de chaque processus de production est décrite à l'aide des conventions établies par von Neumann (1945-46), à savoir un vecteur, une paire de vecteurs - lignes définissant les niveaux relatifs des inputs et des outputs pour une unité d'activité de chaque processus de production. La technologie de l'ensemble des N processus durant la période T, peut être représentée par deux matrices carrées d'ordre N, $\boldsymbol{A}(T)$ et $\boldsymbol{B}(T)$, dont les ièmes lignes respectives notent les inputs et les outputs du ième processus ; et dont les jèmes colonnes respectives indiquent la jème ressource. Les éléments individuels de ces matrices sont notés par des minuscules avec des doubles indices : a_{ij} et b_{ij} respectivement pour les coefficients d'input et d'output. Par exemple, l'élément b_{21} est le*

[74] La notion d'intrumentalisation sera discuté au chapitre 6, elle est cohérente avec la notion utilisée par Michael Kleinod (2017) pp.31-33.

coefficient technique indiquant, relativement aux autres coefficients a_{2j} et b_{2j} , le montant de la ressource 1 apparaissant comme un output pour l'unité d'activité du second processus.

(4) Ces coefficients seront toujours supposés invariables au cours du temps une fois qu'ils ont été spécifiés pour le cas particulier étudié, de sorte qu'aucun indice temporel ne figure sur les éléments de $\boldsymbol{A}$ *et* $\boldsymbol{B}$*.*

(5) Un vecteur d'activité pour le système en cause est le vecteur-ligne (1 x N) noté par $\boldsymbol{y}(T)$*, dont les éléments yi(T) désignent le niveau d'activité du ième processus comme multiple de l'activité de production unitaire notée par les lignes correspondantes de* $\boldsymbol{A}$ *et de* $\boldsymbol{B}$*.*

(6) Toutes les ressources apparaissant en tant qu'inputs dans la période T dans l'ensemble étudié sont supposées être allouées au début de la période ; toutes les ressources apparaissant comme outputs sont supposées être présentes à la fin de la période ; aucun échange entre processus ne doit prendre place avant que la production de la période n'ait été réalisée. C'est-à-dire que les échanges entre processus constituent une réallocation de ressources qui se produit "entre les périodes".

(7) Les ressources totales au début de la période T sont représentées par les éléments qj(T) d'un vecteur ligne (1 x N) : $\boldsymbol{q}(T) = \boldsymbol{y}(T)\boldsymbol{A}$*, où* $\boldsymbol{y}(T)$ *est le vecteur d'activité (1 x N) pour la période T. L'exposant j désigne alors la ressource du jème type.*

(8) Il n'existe ni manne tombée du ciel (pas de "don gratuit") ni de "disparition gratuite", en ce sens que seules les ressources produites (apparaissant comme outputs) dans la période T peuvent apparaître comme inputs dans la période suivante et que toutes les ressources de ce genre doivent nécessairement apparaître comme inputs. Par conséquent, le total des ressources disponibles à la fin de la période T pour redéploiement à la période (T + 1) est donné par : $\boldsymbol{q}(T + 1) = \boldsymbol{y}(T)\boldsymbol{B}$ *; et donc nous avons nécessairement* $\boldsymbol{y}(T)\boldsymbol{B} = \boldsymbol{y}(T + 1)\boldsymbol{A} = \boldsymbol{q}(T + 1)$*. "* (Douguet *et al.* 2008).

Après les matrices A et B du modèle N processus et N ressources auront donc la structure suivante:

$$\begin{bmatrix} a_{11} & . & a_{2n} \\ . & a_{22} & . \\ a_{n2} & . & a_{nn} \end{bmatrix} \cdots\cdots\cdots\cdots \begin{bmatrix} b_{11} & . & b_{2n} \\ . & b_{22} & . \\ b_{n2} & . & b_{nn} \end{bmatrix} \tag{5.2.1}$$

Pour donner un exemple d'un modèle économique de production jointe, nous pouvons nous inspirer de l'exemple que propose Sraffa dans son ouvrage *Production of Commodities by Means of Commodities* de 1960. Supposons un système économique simplifié composé de trois processus de fabrication interdépendants.

120t.iron +160t.*coal* + 80qr.*wheat* +1/4 *labour* ---240t.*iron*

40t.iron +100t.*coal* + 120qr.*wheat* +1/4 *labour* ---360t.*coal* (5.2.2)

40t.iron +40t.*coal* + 200qr.*wheat* +2/4 *labour* ---480qr.*wheat*

Dans le système (5.2.2) le premier processus de fabrication est représenté par le flux de 120 ton d'*iron* (fer), 160 ton de *coal* (charbon) et 80 ton de *wheat* (blé) qui entrent dans la branche du fer, lesquelles permettent de produire 240 ton de fer à travers l'utilisation de *labour* (travail). Les divers marchandises ou inputs peuvent être exprimés dans des unités de mesure ou numéraires différents par exemple en tonne (ton), litres (lt) et heures de travail, ces dernières indiquant le flux des services du travail pour chaque branche. On mélange donc le flux physique avec les flux des services comme le travail. Les 240 tonnes d'*iron* pourront être fabriquées dans leur totalité pour la consommation, quand le système est supposé en état stationnaire, ou reste dans l'économie comme des intrants pour la période prochaine.

Le modèle économique de trois processus de production interdépendants peut être simplifié à travers de l'expression suivante :

Inputs x Taux de profit = Outputs

Ou plus formellement comme suit :

$$Ap(1+\pi)+wL=Bp \tag{5.2.3}$$

A et *B*: matrices carrées de rang n des coefficients techniques. $\forall(i,j), a_{ij} \geq 0, a_{ij}$ représentant la quantité de bien *j* utilisée dans la production d'une unité de bien *i*.

L **:** vecteur colonne d'ordre n des quantités de travail direct incorporées par unité de bien produit (ces quantités sont définies en heures de travail).

p **:** vecteur colonne d'ordre n des prix.

w **:** taux de salaire

π **:** taux de profit.

Comme nous avons constaté dans l'équation 5.2.2, le système des productions a présenté trois processus comporte 4 inconnues et 3 équations, ce qui signifie que la valeur des inconnues ne peut être fixée que de manière exogène. Ce type d'approche nous amène à examiner le système de prix. La discussion sur le système des prix est déjà ancienne : Ricardo et Marx ont avancé sur cette voie en posant que $w=\overline{w}_{subsistance}$. Ensuite le système comporte alors (n-1) équations pour avoir des prix donc : $p_1, p_2, \ldots p_{n-1}$ et (n+1) inconnues, en considérant *w* comme fixé à $\overline{w}$ et π comme variable, nous pouvons représenter l'égalité comme suit (Passinetti, 1975) :

$$Ap(1+\pi)+\overline{w}L=Bp \tag{5.2.4}$$

Dans ce sens, pour avoir une structure de prix, nous voulons nous concentrer sur les différents niveaux de taux de profit. Dans ce cas, nous pouvons considérer deux cas extrêmes et un cas intermédiaire. En considérant le cas extrême où le taux de profit est nul : π =0, étant donné la technique $[A, a_n]$ nous pouvons réécrire l'équation comme suit :

$$Ap + a_n w = p \Rightarrow a_n w = p - Ap \Rightarrow a_n w = (I - A)p \tag{5.2.5}$$

En considérant a_n comme un vecteur et $(I - A)$ comme une matrice non singulière, nous pouvons exprimer l'équation comme suit :

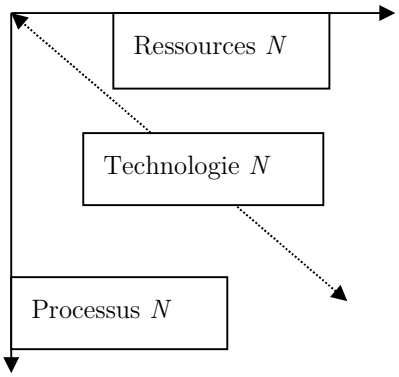
$$p = a_n w(I - A)^{-1} \tag{5.2.6}$$

Les prix p sont tous non négatifs et nous indiquent quand $\pi = 0$ que les prix sont proportionnels aux quantités physiques des facteurs de production. Ensuite, nous posons comme convention générale dans les modèles que toutes les unités d'une même ressource ont le même prix, mais dans la réalité chaque unité peut avoir un taux de profit différent. Finalement, le taux de profit caractérise alors la différence entre la valeur des inputs et la valeur des outputs pour un numéraire déterminé à chaque processus.

5.3. Le modèle de production jointe avec croissance économique

Après avoir étudier un modèle en temp fixe, cette partie se focalisera sur quelques particularités propres d'un modèle plus dynamique. Premièrement, on considère N différents processus technologiques lesquelles utilisent N ressources dans N processus interdépendantes de production économique (O'Connor, 1993).

Graphique 5.3.1. Modèle de production jointe avec croissance économique



Source : L'auteur

Ensuite, nous pouvons écrire le vecteur de prix en utilisant le vecteur propre[75] comme suit :

$$y(T)B = (1 + g)y(T)A \quad \text{où} \quad g = \text{taux de croissance} \tag{5.3.1}$$

[75] Soi ε un space vectoriel sur μ et f un endomorphisme de ε. On apelle vecteur propre de f tout vecteur x, non nul de ε, vérifiant : f(x)= λx. Ensuite les vecteurs propres sont donc les vecteurs dont la direction est inchangée par l'application. Egalement, le scalaire l est appelé valeur propre associée au vecteur x., consulter le site: *http://uel.unisciel.fr/physique/outils_nancy/outils_nancy_ch11/co/apprendre_ch11_20.html* (site consulté le 2 septembre 2015).

$$Bp = (1+\pi)Ap \qquad \text{où} \quad \pi = \text{taux de profit} \tag{5.3.2}$$

Dans un état croissance équitable. Lorsque $q(T+1) = (1+g)q(T)$, alors qu'on peut changer l'approche vers un état de croissance non équitable où les ressources sont complètement utilisés à la fin de la période *T+1*.

$$q(T+1) = y(T)B = y(T+1)A \tag{5.3.3}$$

Ensuite, l'égalité peut être inversée en considérant la matrice *A* comme carre et non singulier.

$$y(T+1) = y(T)BA^{-1} \tag{5.3.4}$$

Suite à cette égalité, il nous semble intéressant d'aborder une application pratique composée de quatre processus distincts et impliquant quatre ressources matérielles distinctes, comme suit (O'Connor, 1993 ; Douguet *et al.* 2008) :

Processus 1: Un processus économique qui utilise un bien capital économique (ressource 1, par exemple la production agricole), avec un bien capital écologique (ressource 3, l'eau de bonne qualité) comme matière première, pour produire davantage de bien économique et un déchet économique (ressource 2, par exemple les résidus des engrais ou des produits phytosanitaires).

Processus 2: Un processus d'élimination des déchets dirigé par les propriétaires de l'économie qui utilise une partie du bien écologique (ressource 3) comme site d'élimination du déchet économique (ressource 2), processus qui consomme le bien écologique ou qui le contamine (ressource 4, l'eau de qualité dégradée).

Processus 3: Un processus écologique dont les fonctions sont de reproduire ou d'augmenter *le capital écologiqu*e (ressource 3, l'eau de bonne qualité).

Processus 4: Un processus d'épuration qui, en utilisant un certain capital économique (ressource 1) dans le processus de *traitement*, effectue la reconversion de l'eau contaminée (ressource 4) en eau de bonne qualité (ressource 3).

Pour étudier séparément certains aspects particuliers de cette interdépendance, on vas considère que dans notre économie les processus 2 et 4 peuvent alors être supprimés (Douguet *et al.* 2008). En conséquence, nous n'avons pas de processus d'élimination et d'épuration du déchet. Dans ce but, nous utilisons une version tronquée du système général, comme ci-dessous :

$$\begin{bmatrix} a_{11} & a_{13} \\ . & a_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_1 \\ p_3 \end{bmatrix} (1+\pi) = \begin{bmatrix} b_{11} & . \\ . & b_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_1 \\ p_3 \end{bmatrix} \tag{5.3.5}$$

L'égalite de 5.3.5 peut être écrite sous forme matricielle comme :

$$Ap\ (1+p) = Bp \tag{5.3.6}$$

Définissons pour plus de commodité $T \equiv B^{-1}A$ (5.3.7)

Ensuite Il est possible de résoudre l'équation précédant pour *T*, cette solution peut être obtenue par :

$Tp = \lambda p$ où $\lambda = 1/(1+\pi)$ (5.3.8)

Les solutions pour λ peuvent être obtenues en posant le déterminant | **T** - λ **I** | = 0. Ceci fournit deux racines (O'Connor, 1993 ; Douguet *et al.* 2008) :

> " $\lambda_1 = a_{11} / b_{11} = 1 / (1 + g_1)$, *dans laquelle* $g_1 = (b_{11} - a_{11}) / a_{11}$ *est le taux de croissance propre de la ressource non-fondamentale 1, produite dans l'économie ; et* $\lambda_3 = a_{33} / b_{33} = 1 / (1 + g_3)$, *dans laquelle* $g_3 = (b_{33} - a_{33}) / a_{33}$ *est le taux de croissance propre de la ressource fondamentale 3 (le capital écologique).*
>
> *Le modèle expliqué ici mis sur pied sur des taux de rendement égaux, tandis que nous pouvons propose un modèle avec des taux de rendement inégaux. Surtout pour les cas avec* $g_1 > g_3$, *selon laquelle l'expansion des systèmes économiques modernes entraîne souvent la dégradation de l'environnement.* "

Une des manières de procéder consiste à supposer l'existence de taux de rendement différents pour chacune des ressources distinctes, en supposant par exemple qu'elles sont contrôlées par des classes distinctes de propriétaires en conflit sur les ressources qu'ils tirent des divers processus (Perrings, 1987). O'Connor en 1993 proposé l'existence de taux de rendement différents non pas entre les ressources, mais entre les sous-ensembles de processus de production.

Selon cette condition nous pouvons exprimer les taux de rendement différents comme I et Π.

Π : Est une matrice diagonale aux éléments non nuls (r_1, r_2, ..., r_N) sont dans la diagonale principale

I : Est la matrice identité.

$$\Pi = \begin{bmatrix} r_1 & & & \\ & r_2 & & \\ & & r_3 & \\ & & & r_4 \end{bmatrix} \qquad \mathrm{I} + \Pi = \begin{bmatrix} 1+r_1 & & & \\ & 1+r_2 & & \\ & & 1+r_3 & \\ & & & 1+r_4 \end{bmatrix} \tag{5.3.9}$$

Ensuite nous pouvons écrire les équations de valeurs comme $A\ (\mathrm{I} + \Pi)\ p = Bp$ où la matrice $(\mathrm{I} + \Pi)$ multiplie le vecteur des prix. Dans cette explication, nous utilisons une version tronquée du système général, comme ci-dessous :

$$\begin{bmatrix} a_{11} & a_{13} \\ . & a_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_1 \\ p_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_1 & . \\ . & r_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b_{11} & . \\ . & b_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_1 \\ p_3 \end{bmatrix} \tag{5.3.10}$$

L'équation 5.3.10 peut être écrire comme suit :

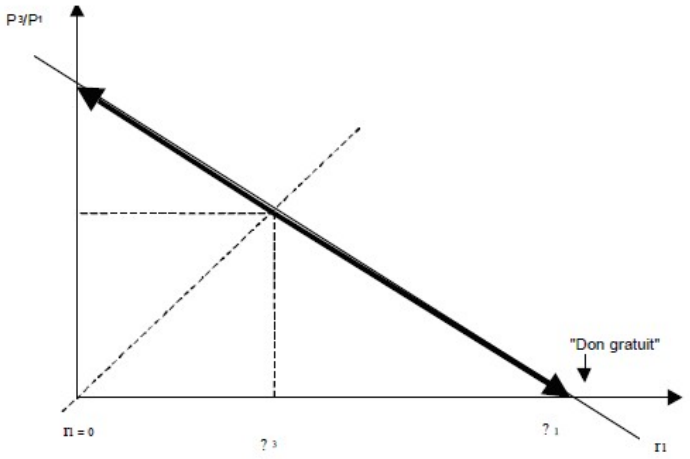
$$(1+r_1)\left[a_{11}p_1 + a_{13}p_3\right] = b_{11}p_1 \tag{5.3.11}$$

A partir de l'équation (5.3.6), en réarrangeant l'équation, nous avons la relation linéaire entre le taux de rendement r_1 dans le processus 1 et les prix relatifs p_3/p_1 (cf. graphique 5.3.2):

$$(p_3 / p_1) = b_{11} / a_{13} - (1 + r_1) a_{11} / a_{13} \tag{5.3.12}$$

Graphique 5.3.2. Représentation des taux de rendement en fonction du rapport de prix P_3/P_1

Le rapport des prix p_3/p_1 est positif, nous avons l'accumulation de valeur non soutenable avec une participation "équitable" des défenseurs de l'eau.



Source : Douguet *et al.* 2008

Finalement, les prix proviennent des transactions entre les processus 3 et 1 qui génère un surplus en fonction des taux de salaire, de profit et de rente. Ensuite c'est bien dans la redistribution du surplus entre les propriétés de l'économie que réside le atractive de ce type de modèle.

5.3.1. Le produit fondamental et non fondamental : Presentation de prix dans une hyperbole équilatère

Suite à la présentation du modèle de production jointe avec croissance économique, nous nous concentrons sur les produit fondamental et non fondamental. Une marchandise est fondamental si elle intervient dans sa propre production et dans celle des autres marchandises, nous apellerons produits non-fondamentaux ce qui n'intervient pas directement ou indirectement dans la production des autres marchandises (Sraffa, 1999).

Pour étudier certains aspects particuliers du taux de rendement, nous utilisons une version tronquée (2x2) du système général, comme ci-dessous :

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{13} \\ a_{31} & a_{33} \end{bmatrix}; B = \begin{bmatrix} b_{11} & b_{13} \\ b_{31} & b_{33} \end{bmatrix} avec \begin{bmatrix} p_1 \\ p_3 \end{bmatrix} \tag{5.3.1.1}$$

L'égalité 5.3.1 peut être écrire comme suit :

$$\begin{aligned} (1 + r_1)\left[a_{11} p_1 + a_{13} p_3\right] &= b_{11} p_1 + b_{13} p_3 \\ (1 + r_3)\left[a_{31} p_1 + a_{33} p_3\right] &= b_{31} p_1 + b_{33} p_3 \end{aligned} \tag{5.3.1.2}$$

Ensuite nous pouvons exprimer en fonction de Ψ les différents taux de rendement I et Π. comme :

$$\Psi = \mathrm{I} + \Pi = \begin{bmatrix} 1+r_1 & 0 \\ 0 & 1+r_3 \end{bmatrix} \tag{5.3.1.3}$$

En réarrangeant les équations précédant pour faire le traitement du prix.

$$\begin{aligned} &(1+r_1)[a_{11}p_1 + a_{13}p_3] = b_{11}p_1 + b_{13}p_3 \Rightarrow (1+r_1)a_{11}p_1 + (1+r_1)a_{13}p_3 = b_{11}p_1 + b_{13}p_3 \\ &\Rightarrow [(1+r_1)a_{11} - b_{11}]p_1 = [(1+r_1)a_{12} - b_{13}]p_3 \end{aligned} \tag{5.3.1.4}$$

À partir de l'équation précédant, en réarrangeant et en supposant que, p_1 et $p_3 \neq 0$, on obtient p_3/p_1:

$$(p_3 / p_1) = -[(1+r_1)a_{13} - b_{13}]/[(1+r_1)a_{11}/b_{11}] \tag{5.3.1.5}$$

De la même manière. En réarrangeant les équations précédant pour éliminer le prix.

$$\begin{aligned} &(1+r_3)[a_{31}p_1 + a_{33}p_3] = b_{31}p_1 + b_{33}p_3 \Rightarrow (1+r_3)a_{31}p_1 + (1+r_3)a_{33}p_3 = b_{31}p_1 + b_{33}p_3 \\ &\Rightarrow [(1+r_3)a_{31} - b_{31}]p_1 = [(1+r_3)a_{33} - b_{33}]p_3 \end{aligned} \tag{5.3.1.6}$$

À partir de l'équation précédant, en réarrangeant et en supposant que, p_1 et $p_3 \neq 0$, on obtiens p_3/p_1:

$$(p_1 / p_3) = -[(1+r_3)a_{33} - b_{33}]/[(1+r_3)a_{31}/b_{31}] \tag{5.3.1.7}$$

Ensuite, la relation de prix (p_1 / p_3) aura donc la structure suivante :

$$(1+r_1)[a_{11} - a_{13}]/[(1+r_1)a_{11} - b_{11}] = [(1+r_3)a_{33} - b_{33}]/[(1+r_3)a_{31} - b_{31}] \tag{5.3.1.8}$$

À partir de l'équation précédant, on obtient:

$$(1+r_1)[a_{13} - a_{13}][(1+r_3)a_{31} - b_{31}] = [(1+r_3)a_{33} - b_{33}][(1+r_1)a_{11} - b_{11}] \tag{5.3.1.9}$$

Ensuite, nous pouvons exprimer $(1+r_1) = \Psi_1$ et $(1+r_3) = \Psi_3$ et en réarrangeant l'équation précédant.

$$[a_{11}a_{33} - a_{13}a_{31}][\Psi_1\Psi_3] - [a_{11}a_{33} - a_{13}a_{31}]\Psi_1 - [b_{11}a_{33} - b_{13}a_{31}]\Psi_3 - [b_{11}b_{33} - b_{13}b_{31}] = 0 \tag{5.3.1.10}$$

L'expression $[a_{11}a_{33} - a_{13}a_{31}]$ de 5.3.1.10 correspond au déterminant de la matrice A, en supposant que $det\boldsymbol{A}$=0, on obtient:

$$\Psi_1\Psi_3 - \alpha\Psi_1 - \beta\Psi_3 - \gamma = 0 \tag{5.3.1.11}$$

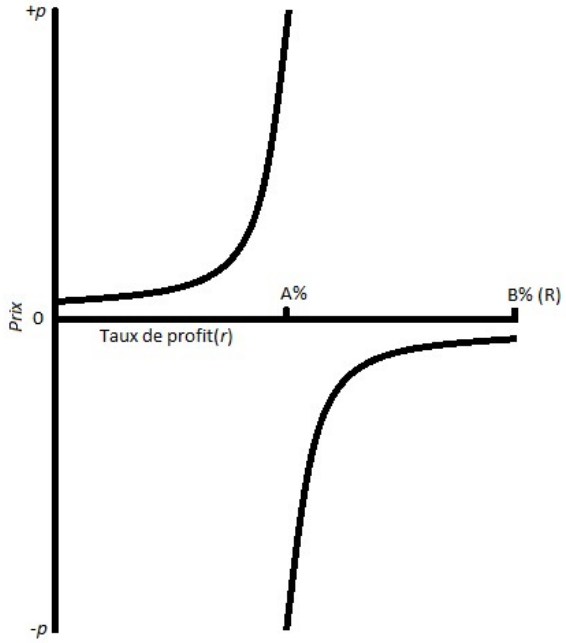
$$\alpha = \frac{[a_{11}b_{33} - b_{31}a_{13}]}{[a_{11}b_{33} - a_{31}a_{13}]}; \beta = \frac{[b_{11}a_{33} - a_{31}b_{13}]}{[a_{11}a_{33} - a_{31}a_{13}]}; \gamma = \frac{[b_{11}b_{33} - b_{31}b_{13}]}{[a_{11}a_{33} - a_{31}a_{13}]} = \frac{\det B}{\det A} \tag{5.3.1.12}$$

Nous pouvons réarranger l'expression pour trouver la forme d'une hyperbole.

$$\Psi_1\Psi_3 = \alpha\Psi_1 + \beta\Psi_3 + \gamma \tag{5.3.1.13}$$

Une version de la relation entre le prix et le taux de profit est représentée dans le graphique 5.3.3.

Graphique 5.3.3. La relation des prix et le taux de profit dans une hyperbole équilatère



Source : L'auteur à partir de Sraffa, 1999

Dans le graphique 5.3.3 le taux maximum de profit est supposé egal à B%. De plus, la courbe des prix a été représentée pour les deux branches d'une hyperbole équilatère qui a pour asymptotes l'axe des taux de profit (r) et la parallèle à l'axe des prix qui passe par le point A%.

Une produit fondamental devra être un taux de profit inférieur à A%, autrement dit la productivité du produit fondamental ne dépassera pas à A%. Au moment où le taux de profit s'approche à A%, le prix du produit fondamental devra être vers $+p$.

Quand le taux de profit depasse A%, le prix prend une valeur negative vers -p, c'est le cas d'une marchandise non fondamental (Sraffa, 1999).

Suite à notre présentation du prix et des taux de rendement différents, nous voulons définir les unités d'échange entre les systèmes, lesquelles peuvent être, par exemple, de source fiduciaire comme la monnaie, ou biophysiques comme l'énergie. Nous voulons montrer que dans une logique Sraffienne, il est possible de définir plusieurs marchandises homothétiques sur la base d'un système de production, ce qui nous permettra d'étudier la variation sur les prix relatifs des biens à travers de la valeur de la marchandise étalon. Pour illustrer cette valeur, il faut utiliser une valeur d'échange par laquelle les autres valeurs sont calculées c'est-à-dire le numéraire.

Cela a été reconnu dans la littérature économique où au moins deux méthodes différentes ont été appliquées pour sélectionner le numéraire. La première se concentre du côté de l'offre et trouve son origine dans les travaux de Robert Torrens (1821). La méthode consiste à définir un numéraire de sorte qu'il soit proportionnel à la structure d'entrée de l'économie. Le deuxième s'adresse à la demande et a

été préconisé par Irving Fisher (1930). Il se résume à choisir le numéraire de manière à ce qu'il soit représentatif des profils de consommation des agents économiques.

En outre, les travaux d'O'Connor *et al.* (2008) vont servir de tremplin pour une formulation du numéraire remettant en cause le dogme de Bidard *et al.* (2001a,b). Pour étudier certaines propriétés matricielles et numéraires nous utilisons une *matrice décomposable* en 4 lignes et 4 colonnes qui est constitué de blocs, comme ci-dessous :

$$A=\begin{bmatrix}\begin{pmatrix}a_{11} & 0\\ 0 & a_{22}\end{pmatrix} & 0\\ \begin{pmatrix}a_{31} & a_{32}\\ a_{41} & a_{42}\end{pmatrix} & \begin{pmatrix}a_{33} & a_{34}\\ a_{43} & a_{44}\end{pmatrix}\end{bmatrix};B=\begin{bmatrix}\begin{pmatrix}b_{11} & 0\\ 0 & b_{22}\end{pmatrix} & 0\\ 0 & \begin{pmatrix}b_{33} & b_{34}\\ b_{43} & b_{44}\end{pmatrix}\end{bmatrix} \tag{5.3.1.14}$$

Ensuite les taux des rendements peuvent être separé entre Π_{DD}pour les processus donateurs et Π_{MM} pour les processus consommateurs, comme ci-dessous :

$$\mathrm{I}+\Pi=\begin{bmatrix}\mathrm{I}+\Pi_{DD} & 0\\ 0 & \mathrm{I}+\Pi_{MM}\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}\begin{pmatrix}1+r_1 & 0\\ 0 & 1+r_2\end{pmatrix} & 0\\ 0 & \begin{pmatrix}1+r_3 & 0\\ 0 & 1+r_4\end{pmatrix}\end{bmatrix} \tag{5.3.1.15}$$

Les equations 5.3.1.14 et 5.3.1.15 peuvent être réécrit en notation matricielle, en utilisant les relations entre le donneur et les processus consommateurs et donc, dans ce but, nous utilisons une version tronquée du système général, comme ci-dessous :

$$\begin{bmatrix}A_{DD} & 0\\ A_{MD} & A_{MM}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}P_D\\ P_M\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\mathrm{I}+\Pi_{DD} & 0\\ 0 & \mathrm{I}+\Pi_{MM}\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}B_{DD} & 0\\ 0 & B_{MM}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}P_D\\ P_M\end{bmatrix} \tag{5.3.1.16}$$

Nous voyons immédiatement un chemin vers une solution des équations :

$$\begin{aligned}&A_{DD}P_D\left(\mathrm{I}+\Pi_{DD}\right)=B_{DD}P_D\\ &\left(A_{MD}P_D+A_{MM}P_M\right)\left(\mathrm{I}+\Pi_{MM}\right)=B_{MM}P_M\end{aligned} \tag{5.3.1.17}$$

Nous définirons $A_{MD}=\left[R,L\right]$; L comme un vecteur des entrées des coefficients de travail, R comme le vecteur des entrées des coefficients des services environnementaux, ρ comme un vecteur de prix de travail et w comme un vecteur de prix pour les services environnementaux.

Donc, nous pouvons réécrire la dernière équation comme :

$$\left(R\rho+Lw+A_{MM}P_M\right)\left(1+\pi\right)=B_{MM}P_M \tag{5.3.1.18}$$

Ensuite le taux réel du profit $\pi_{i,t}$ peut être composé par la combinaison des méthodes i à la période t est le rapport entre les bénéfices réels et la valeur des entrées. Nous utilisons pour représenter le taux de profit, le panier (d,e,f) et les prix (p, ρ ,w), dans ce modèle d représente un vecteur de biens produits, e un vecteur de ressources épuisables et f un scalaire de travail, p représente un vecteur de prix des biens produits, ρ représente un vecteur des prix des ressources épuisables, w représente un vecteur des prix de travail.

$$\pi_{i,t} = \frac{\dfrac{B_{MM} p_{t+1}}{\left(dp_{t+1} + ep_{t+1} + fw_{t+1}\right)}}{\dfrac{\left(A_{MM} p_t + rp_t + l_i w_t\right)}{\left(dp_t + e\rho_t + fw_t\right)}} - 1 \qquad (5.3.1.19)$$

Finalement, supposons que nous définissons la valeur du panier égale à un, soit nous choisissons la norme soit le numéraire d'échange inter temporel:

$$\left(dp_t + e\rho_t + fw_t\right) = 1 \qquad (5.3.1.20)$$

5.4. Un modèle de production jointe et le bouclage des flux

Après avoir défini les modèles de base, leurs unités d'échanges ou numéraires, il nous semble intéressant d'aborder un ensemble économique environnemental composé de trois processus distincts et impliquant trois ressources matérielles distinctes, comme suit :

(1) *Processus D* (l'environnement comme donneur) : Processus écologique en utilisant un bien capital écologique (ressource d, l'eau), pour produire ou entretenir le stock d'un capital écologique (ressource d, l'eau).

(2) *Processus M* (l'économie comme moyen de production): Processus économique en utilisant un bien capital économique (ressource m, par exemple le travail), avec un bien capital écologique (ressource m, l'eau de bonne qualité) comme matière première, pour produire des déchets (ressource w, l'eau de qualité dégradée).

(3) *Processus W* (traitement du déchet) : Processus d'épuration qui effectue la reconversion de l'eau contaminée (ressource w, l'eau de qualité dégradée) en eau de bonne qualité (ressource d).

À un niveau général, les matrices A et B du modèle à trois processus et trois ressources auront donc la structure suivante :

$$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & A_{mm} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & B_{mm} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \qquad (5.4.1)$$

Au début il existe une rélation entre entrants et sorties. Egalement, dans une vision d'une économie industrielle, on représente les *inputs* par A_{mm} et les *outputs* par B_{mm}. Ensuite on peut représenter dans le même processus M des *inputs* qui viennent de l'environnement par A_{md} et qui peuvent être considérés au début comme *donnés* par l'environnement, et dans le même temps on peut représenter des déchets dans les *outputs* par B_{mw}.

$$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ A_{md} & A_{mm} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdots\cdots\cdots\cdots \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & B_{mm} & B_{mw} \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \tag{5.4.2}$$

Ensuite pour analyser les flux de matière entre les *inputs* et les *outputs*, nous pouvons caractériser le B_{wm} comme un déchet agricole qui peut être recyclé, dans cette logique circulaire, les déchets agricoles sont représentés par A_{wm} et A_{ww}. Ainsi, on redéfinit les déchets comme des *inputs* intégrés dans les activités économiques à travers une division entre déchets recyclables et non recyclables.

$$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ A_{md} & A_{mm} & 0 \\ 0 & 0 & A_{ww} \end{bmatrix} \cdots\cdots\cdots\cdots \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & B_{mm} & B_{mw} \\ 0 & B_{wm} & 0 \end{bmatrix} \tag{5.4.3}$$

À travers ces transformations, on redéfinit les produits et processus et on fait une partition au niveau des déchets : recyclables en B_{ww} et non recyclables en B_{**}, pour reconvertir ces déchets et les intégrer dans l'économie en A_{ww}. Une partie de ces déchets revient dans l'économie par A_{wn} et A_{**} qui représente les décharges qui peuvent être stockées.

$$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ A_{md} & A_{mm} & 0 \\ 0 & A_{wm} & A_{ww}/A_{**} \end{bmatrix} \cdots\cdots\cdots\cdots \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & B_{mm} & B_{mw} \\ 0 & B_{wm} & B_{ww}/B_{**} \end{bmatrix} \tag{5.4.4}$$

Ensuite nous pouvons recycler une partie des déchets et leur assigner une valeur économique positive. Ainsi, nous pouvons considérer que les déchets sont nuisibles et en conséquence, que *nous devons nous en débarrasser*. Nous pouvons donc considérer qu'il y aurait un paiement pour la dépollution qui peut être compensé ou subventionné à travers un processus de valorisation.

Comme solution au sujet de l'abatement et de la décharge de polluant, nous pouvons trouver le même Processus M (l'économie comme moyen de production) du dernier modèle avec $B_{mw\text{ en}}$ tant que déchets qui posent problèmes. Ainsi, nous pouvons dépolluer les déchets comme A_{ww} et le pollueur paye un prix négatif pour polluer en A qui compense le prix d'élimination ou de neutralisation des déchets en B, cf. le système 5.4.4.

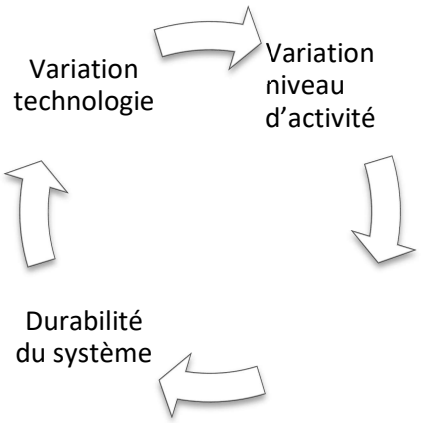
$$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & A_{mm} & 0 \\ 0 & A_{wm} & A_{ww} \end{bmatrix} \cdots\cdots\cdots\cdots \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & B_{mm} & B_{mw} \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \tag{5.4.5}$$

Un système similaire qui utilisé une subvention pour la création d'un processus de valorisation ou de compostage sera utilisé au chapitre XIII.

5.5. La frontière technologique dans une modèle de production jointe

Autre question conceptuelle associée et utilisée dans notre cas de modélisation dans la partie V est le changement dans les niveaux d'activité engendré par une variation de la technologie. Celle-ci produisent en effet une variation au niveau de la caractérisation des processus ce qui modifie les caractéristiques de durabilité du système.

Figure 5.5.1. Changement dans le niveau d'activité : Variation de la technologie

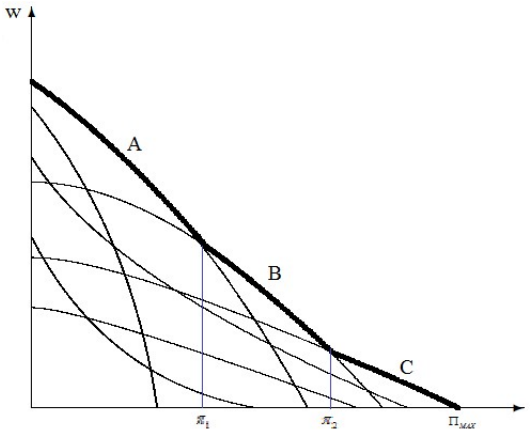


Source : L'auteur

Le cycle de la figure 5.5.1 présente les effets qui sont des conséquences mécaniques et séquentielles de la variation des prix relatifs. Ce type d'argumentation en termes de prix relatifs pour un processus circulaire nous amène à une solution duale : d'une part, il existe une solution qui permet d'identifier quelles sont les activités qui sont adaptables à une économie circulaire et d'autre part il existe des prix relatifs qui caractérisent la valeur monétaire des services et ressources qui sont mobilisés dans l'ensemble.

De même, nous pouvons expliquer l'effet que produit le changement de technologie en termes généraux. Nous disposons donc de X méthodes techniques alternatives pour produire chaque marchandise, nous définirons ces techniques par les lettres A, B, C pour montrer les possibilités de répartition du revenu w.

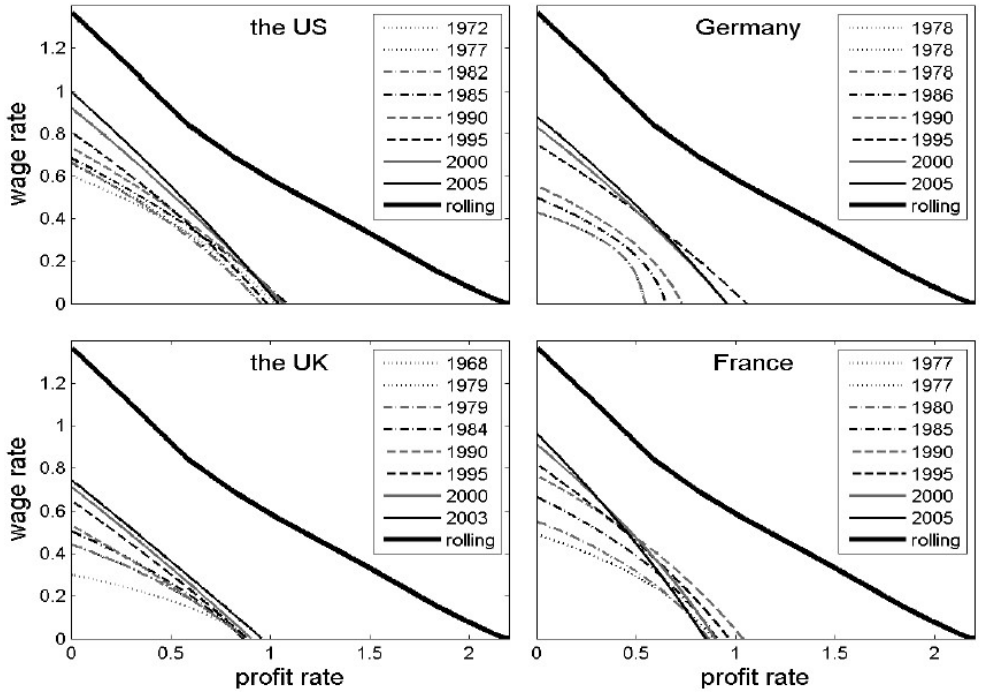
Graphique 5.5.2. La frontière technologique des possibilités de répartition du revenu.



Source: L'auteur à partir de Passinetti, 1975

Le graphique 5.5.2 exprime les combinaisons de revenu et de taux de profit π lorsque le taux de profit évolue vers un taux de profit maximum $\prod = \pi_{(w=0)}$. Ces techniques pouvant être le résultat d'une combinaison de processus productifs inefficaces, les seules techniques pertinentes sont celles qui forment le parapluie constitué par la ligne grasse noire, entre w et $\Pi_{\max}$. Ce parapluie A-B-C constitue une caractéristique de chaque économie comme le montre le tableau suivant.

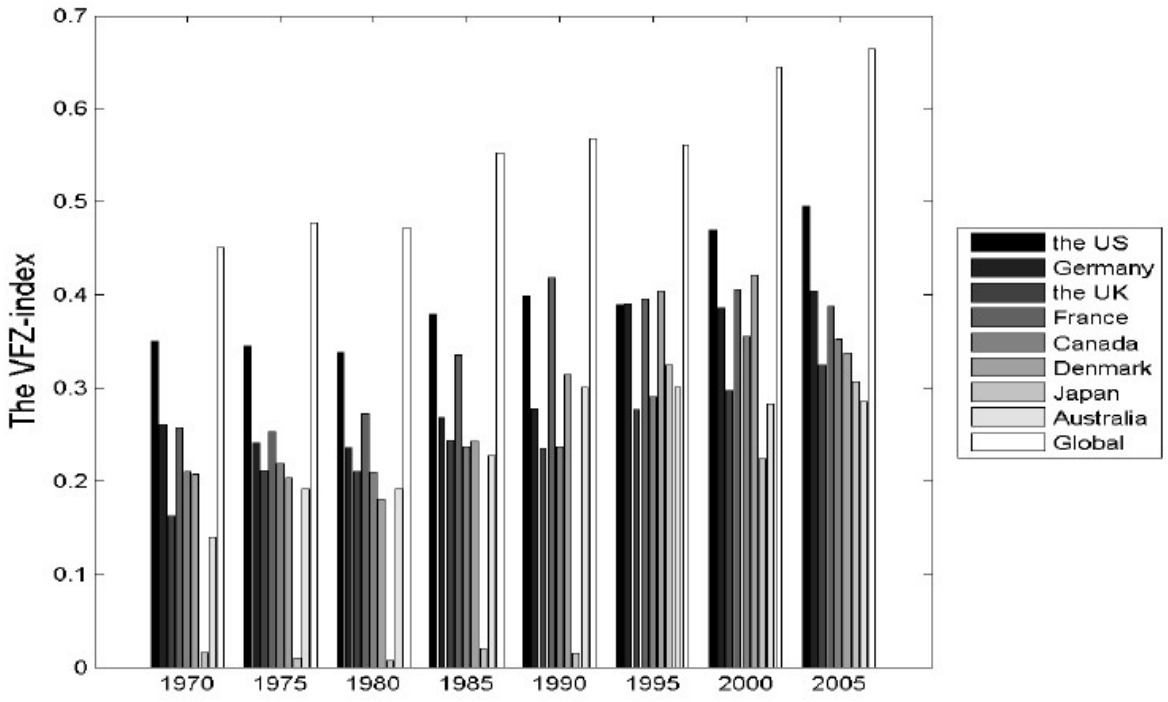
Graphique 5.5.3. La frontière technologique entre salaires et profits: les États-Unis, l'Allemagne, la Royaume-Uni, et la France.



Source: Zambelli *et al.* 2011

La frontière technologique peut être interprété comme l'efficience maximale de la technologie actuelle, car elle fournit un indicateur du niveau potentiel maximum de la productivité du chaque système. Nous pouvons également fournir une mesure de la frontière technologique en utilisant l'indice VFZ (Velupillai-Fredholm-Zambelli) (Zambelli *et al.* 2011), laquelle est calculée comme suit : un moins la moyenne de la distance verticale entre les différentes frontières salaires et profit de chaque pays et la frontière technologique (ligne grasse noire). De plus, la gamme de l'indice est comprise entre zéro et un, donc, plus l'indice est proche de l'unité, plus efficace est la technologie utilisée dans le pays par rapport au maximum théorique proposé par la frontière technologique.

Graphique 5.5.4. L'indice VFZ (Velupillai-Fredholm-Zambelli)



Source: Fredholm *et al.* 2009

Le graphique 5.5.4 montre pour chaque pays la différence entre le niveau de 1970 et 2005 laquelle correspond à un taux de croissance de : 1,0 État unis ; 1,2 Allemagne ; 2,0 UK; 1,2 France ; 1,5 Canada ; 1,4 Danemark ; 2,1 en l'Australie et 8,1 sans surprise pour le Japon.

Nous ne pouvons pas argumenter que cette augmentation technologique permet directement une augmentation de la durabilité. De plus, la variation de la technologie produit une variation au niveau de la caractérisation des processus laquelle peut dans certaines occasions modifier les caractéristiques de durabilité du système. Finalement, il est certainement difficile d'améliorer la durabilité à travers une augmentation de technologie dans le processus productif, mais il existe un autre regard à travers la mesure et l'amélioration de la performance dans le flux des *outputs* comme les déchets et leur recyclage. Dans cette voie , nous proposons de explorer des cas de bouclage de flux de matières en utilisant la technologie pour produire une augmentation de la durabilité du système.

5.6. Conclusion du chapitre 5

Le chapitre V présente le message principal du travail de Sraffa et comment celui-ci se comprend par rapport à certains travaux important en théorie de la valeur (Ricardo, les marginalistes, Von Neumann).

Une théorie de la valeur signifie qu'une valeur est attribuée à chaque marchandise (bien ou service) produit par le système, de telles sortes que l'on puisse échanger chaque marchandise contre une quantité calculable de chaque autre marchandise. On pose généralement que chaque unité de marchandise possède la même valeur. Dans la théorie de Sraffa, la valeur signifie le rapport d'échange qui, si les échanges étaient effectivement réalisés, permettrait de reproduire le système et de distribuer tout le surplus (s'il y en a un) aux différents agents (salariés, capitalistes, rentiers et l'État aussi si l'on introduit des taxes).

Dans notre thèse, l'usage de l'approche de production jointe permet de donner un cadre de réflexions sur les relations de valeur entre le système économique et la biosphère. Il est difficile de donner un jugement précis sur flux des marchandises ou des ressources naturelles dans les compartiments de la biosphère tant que celle-ci n'est pas considérée en rapport avec la valeur des commodités ou des biens naturels. Dans ce sens, le chapitre VII présente une typologie qui essaie de structurer dans dix différents parcours les flux de matière et d'énergie dans un univers entropique.

Les chapitres VIII et IX présentent l'élaboration de l'ensemble des processus et de transferts des production physique interdépendants. Il donne également un définition formel du système de valeur, nous en utilisons pour calculer les prix relatifs de ressources écologiques des biens, des déchets, du travail et de l'énergie.

Par ailleurs, il est illusoire de croire que si on intègre les ressources écologiques, les prix seront plus justes, ou plus soutenables. On peut tout de même choisir de représenter les ressources écologiques, mais alors cela signifie qu'un prix leur est attribué. Que signifie ce prix ou cette relation de valeur? Si les ressources écologiques ne sont pas produites dans une usine avec une structure de coûts, et servent donc d'apport extérieur pour le système économique, le prix correspond à une rente, c'est-à-dire à un prélèvement du surplus en faveur du propriétaire de la ressource écologique. Si les ressources écologiques sont produites, le prix incorporera les échanges nécessaires à la reproduction du système et s'il y a un taux de profit positif, il incorporera aussi la valeur d'une part du surplus. Dans ce sens, le chapitre XII est consacré à l'analyse de ces relations par une méthode d'itérations de prix. Il est aussi l'occasion de tester la capacité de la démarche de production jointe de donner un cadre pour analyser le partage des ressources entre les processus économiques et la biosphère, en considérant laes diverses échelles temporelles de processus économiques et naturels.

CONCLUSION DE LA PARTIE II

Dans la Partie I, nous avons montré d'une façon générale les grands cycles de la biosphère qui respectent les principes de base de l'économie circulaire. Selon ces principes, la théorie de la valeur économique et les principes de la gouvernance des frontières entre l'économie et l'environnement devraient offrir une perspective holistique et pouvoir traiter des thématiques territoriales à hauts degrés de complexité de la biosphère.

À la suite de la définition de biosphère, nous avons exposé un résume qui représente fondamentalement les grands cycles biogéochimiques, le concept d'économie circulaire et la méthodologie économique appliquée à l'environnement. Ensuite, pour étudier les interactions entre les divers éléments de la géosphère, il est utile de classer ces éléments en différents systèmes ou cycles. De même, nous voulons présenter dans la première chapitre plusieurs visions cycliques en utilisant les molécules de carbone, azote, phosphore, souffre et l'eau comme numéraire.

La seconde partie mit en évidence la notion d'économie circulaire, dans une vision systémique. Dans ce sens, l'économie circulaire est un sujet ambitieux. C'est-à-dire que thermodynamiquement est assez impossible de créer un zéro déchet comme dans une économie fermée en boucle (Clift *et al.* 2011). Dans ce bouclage, nous devons faire la distinction entre les systèmes biologiques et les systèmes industriels.

Les chapitres IV et V de cet état de l'art ont été consacrés à la présentation de différentes méthodes d'analyse économique de l'environnement : modélisation I/O et modélisation de production jointe. De plus, le chapitre IV permet d'explorer les limites de la modélisation I/O. Ce chapitre présente un cadre méthodologique visant à intégrer l'approche de circularité des grands cycles à un modèle I/O hybride en unités monétaires et unités physiques. Le chapitre V constitue un préalable pour explorer les usages et extensions de la production jointe par rapport au la durabilité de l'environnement sur le long terme vers un *état stationnaire*. Ensuite ces modèles permettant de proposer un cadre méthodologique guidant le développement d'un modèle hybride avec des indicateurs qui permettant des mesurés les flux circulaires ou cascade des cycles.

Le chapitre VI présente de façon intégrer les relations entre le système de valeur en échange de l'interface biosphère et économie dans une *vision marxiste* et un système en régulation. Ce système de régulation est une expression de fonctionnement d'un subensemble des sociétés humaines. Ce système est l'expression des *relations fondamentalement asymétriques* entretenu pour le système capitalisme entre la biosphère et l'économie.

PARTIE III.- INSTITUTIONNALISME : GOUVERNANCES SUR LES FRONTIERES ENTRE LA BIOSPHERE ET L'ECONOMIE.

6. CRITIQUES CONTEMPORAINES DE L'ECOLOGIE POLITIQUE ET DEBATS AUTOUR DE THESE PORTEE PAR JASON MOORE

LE DEFI DE CE CHAPITRE EST DE REPRESENTER DE FAÇON INTEGREE les relations du système de valeur en échange entre biosphère et économie, dans un système en régulation.

D'abord, Sraffa (1970) a proposé une représentation abstraite des relations entre les commodités à l'intérieur d'un système de régulation. Ce système de régulation est une expression de fonctionnement d'un subensemble des sociétés humaines. Ce système est également l'expression des *relations fondamentalement asymétriques* entretenu pour le système capitalisme entre la biosphère et l'économie.

6.1 Le changement des frontières entre la biosphère et l'économie : Qu'entend-on par limites planétaires ?

Cette partie se focalise sur la thématique des limites planétaires. Qu'entend-on par limites planétaires ? Ce sont les limites que nous devrions ne pas dépasser pour éviter un changement d'état du système terre. Ces limites sont les indicateurs qui nous permettent de comprendre depuis quand et puis comment à l'avenir nous basculerons ce qu'on appelle l'Anthropocène, qui est l'ère géologique qui aurait commencé avec ce qu'on appelle la grande accélération durant les années 50 du siècle dernier, c'est-à-dire l'explosion de nos activités économiques, l'explosion de la démographie humaine ont fini par exercer un effet massif sur le système Terre. C'est précisément cet effet massif que l'on mesure avec ces limites planétaires.

En outre, Johan Rockström et ses collègues ont identifié, dans un célèbre article publié dans la revue Nature en 2009, 9 limites planétaires : 1) le changement climatique ; 2) l'érosion de la biodiversité ; 3) la consommation d'eau douce ; 4) les émissions d'aérosols dans l'atmosphère ; 5) l'occupation du sol et la déforestation ; 6) la perturbation des cycles biogéochimiques de l'azote et du phosphore ; 7) la pollution chimique ; 8) la destruction d'ozone stratosphérique ; 9) l'acidification des océans. Également, dans l'étude de Rockström et *al* (2009), trois limites étaient franchies : la perturbation des cycles biogéochimiques de l'azote et du phosphore ; le changement climatique ; l'érosion de la biodiversité.

Ensuite les deux premières limites de Rockström *et al.* (2009), celles concernant le changement climatique, celle concernant la biodiversité, même déjà l'érosion causées par les populations, nous les avons déjà franchies, car elles nous font basculer dans un état irrémédiablement différent par rapport à celui plus paisible et plus favorable de nos activités que nous avions connu. W. Steffen et *al* (2015) montrent qu'une quatrième limite a été franchie, celle de l'occupation du sol et de la déforestation.

Finalement, les chapitres XI et XII de la thèse abordent les autres limites planétaires que nous avons outrepassées. Entre outre, celles qui concernent un grand cycle biogéochimique : celui de l'azote, qui été très directement lié à nos activités agricoles. Alors on avait déjà abordé un autre cycle, grand cycle biogéochimique, celui du carbone (cf. chapitre I).

Ce changement des limites planétaires peut être décrire à travers de deux doctrines simultanées ou *simultaneous movements*. D'abord, la courant principal déclare que le capitalisme été capable d'internaliser la planète vivante et leurs processus biogéochimiques. Un second groupe déclare l'internalisation du capitalisme comme partie de la biosphère (Moore, 2015).

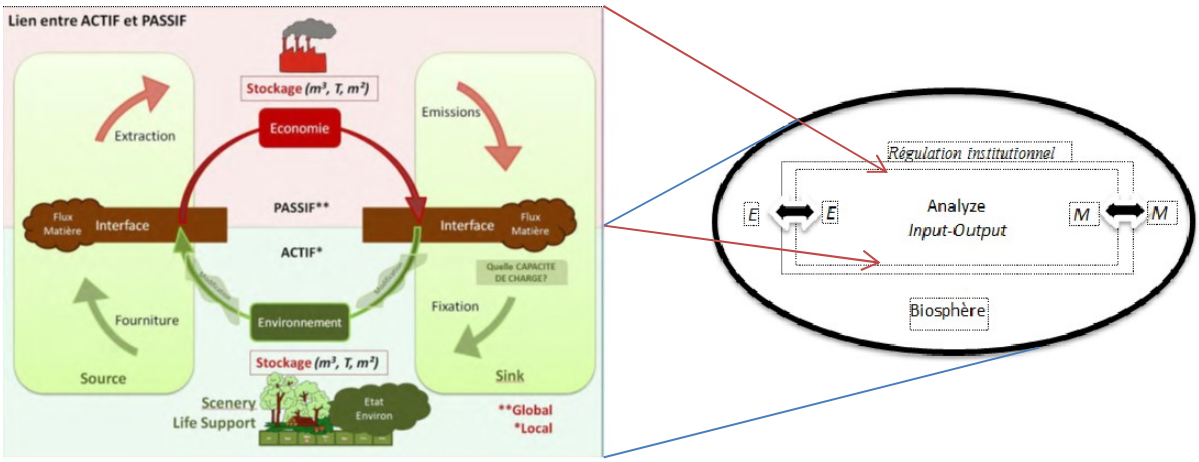
Dans ce deuxième groupe ou doctrine, et revenont au premier chapitre de la thèse. Nous pouvons formuler notre approche pour analyser le rapport entre l'économie en utilisant un système complexe composé d'éléments biogéochimiques du capital naturel et des biens économiques. Dans cette démarche, nous avons déjà défini :

- *Les usages ou passifs écologiques:* Les déchets ou l'empreinte écologique des éléments des cycles de la biosphère.

- *La capacité :* Nous définirons *l'actif écologique* (Loiret, 2013b) comme la capacité du système de fournir des ressources comme les services écosystémiques. Cette capacité peut être *stockée ou mobilisée* pour les acteurs de l'économie. Les *ressources stockées* restent dans le réservoir comme la lithosphère ou l'atmosphère.

De plus, les écarts entre usages et capacités présentent une controverse du point de vue des acteurs de l'économie entre le stockage et l'utilisation des ressources naturelles (Hartwick, 1977). À cause de cette concurrence, nous pouvons représente une partie des cycles comme l'économie et d'autres comme les actifs de l'environnement. Ce système *actif/passif* (Figure 6.1) peut être caractérisé à travers de quatre parties : Fourniture, Extraction, Émissions et Fixation (cf. au début du chapitre I).

Figure 6.1 : L'*actif/passif* vers le concept du *système-monde*



Système *actif/passif* Concept du *système-monde*

Auteur : Adapté pour l'auteur à partir d'Armand, 2011

Suite à la présentation des passifs et des actifs, le système peut être adapté vers le concept du *système-monde* qui a été inventé par Fernand Braudel (1947 ; 1988) et développé par Immanuel Wallerstein (1974).

Le livre *World-Systems Analysis*, écrit Immanuel Wallerstein en 1974 apporte un résumé il y a quarante ans pour comprendre la voie du développement du monde moderne. Également, il explique les caractéristiques déterminantes du sujet, décrivant les structures et les systèmes d'échange de valeur sur laquelle elle est fondée.

En outre, il existe trois grands blocs de construction intellectuelle dans la théorie de Wallerstein: l'école des Annales[76], la théorie marxiste et la théorie de la dépendance.

L'école des Annales, dont le représentant majeur est Fernand Braudel utilise une approche historique. Également, Wallerstein a aussi insisté comme Braudel sur l'approche de long terme (Braudel, 1947). De Marx, Wallerstein a appris la centralité du processus d'accumulation et de luttes de classes concurrentielles qui en découlent. Également, la théorie de la dépendance se concentre sur la compréhension de la *périphérie* en regardant les relations centre-périphérie.

Le résultat de l'échange entre le centre et la *périphérie* était un flux de plus-value (Wallerstein, 1947). Le but de notre modèle est de présenter dans le centre de la figure 6.1 droite, le système économique formalisé à travers l'*analyse d'entrée-sortie* ou analyse *Input-Output* en utilisant la structure de Wallerstein. De plus, la *périphérie* est la biosphère qui apporte des *intrants* comme la matière et l'énergie de la biosphère à l'économie (en termes d'extraction des ressources naturelles), et sort de la biosphère en termes de pollution ou du déchets.

La relation entre la conservation de la biosphère ou périphérie et de l'économie ou noyau est une question complexe en économie écologique. Des questions telles que les systèmes de régulations physiques et institutionnelles d'échanger entre les deux compartiments comme les lois de conservation de la masse (M) et de l'énergie (E) et les mécanismes institutionnels, cf. la figure 6.1 droite. Les lois de la thermodynamique sont pertinentes parce que l'activité économique est entropique en générant des déchet. Un système très organisé est dit faible entropie (par exemple les biens économiques), au contraire, un système désordonné est dit à haute entropie (par exemple les déchets de construction).

Il y a eu plusieurs tentatives pour intégrer les questions écologiques dans les modèles post-keynésiens, afin de concilier ces visions. La méthode intègre implicitement les lois de la thermodynamique pour influer sur les modèles de flux et fonds (Georgescu-Roegen, 1971 ; 1979 ; 1984). En 1971, Georgescu-Roegen fait une distinction importante entre les ressources de flux en ce qui concerne l'énergie et la matière (par exemple, engrais, gasoil) qui est les entrées nécessaires dans le processus de culture agricole pour les ressources du fonds (par exemple, un tracteur, travailleur) qui se réfère à la structure de support fourni pendant le processus de production agricole. Donc, les ressources ne sont pas transformées au cours du processus de production agricole (Mayumi, 2001; Daly *et al.* 2011).

Autre tentative pour intégrer les questions écologiques dans les modèles économiques a été faite pour Jason Moore (2015) dans leur ouvrage *Capitalism in the Web of Life ?* Ce livre part de la prémisse selon laquelle l'homme maitrise la relation dualiste et quelque peu antagonique entre *Nature/Société.*

En philosophie, le dualisme correspond à la description, pour un domaine donné, de deux entités ou principes, inséparables, nécessaires et irréductibles l'un à l'autre et qui coexistent (ex: esprit et matière) [77]. Pour Jason Moore le concept de dualisme devient dans la relation de valeur ou prix du travail de

[76] L'école est née comme une réaction à l'histoire positiviste dominant du début du XXe siècle, les annales marquent plus de soixante ans d'historiographie française, et au-delà, au travers de figures comme Fernand Braudel.

[77] Système philosophique ou religieux qui divise son objet en deux sous-éléments s'opposant irréductiblement, consulter le site: *http://www.larousse.fr/dictionnaires/francais/dualisme/26913#tAc0URITYUVhTfdM.99* (site consulté le 20 septembre 2016).

l'homme qui a été considéré comme des forces devant être contrôlées, dominées, mises au travail et finalement domestiquées ou civiliseés. Donc la société moderne propose que certains groupes des Humaines (*H*) soient considérés comme la Société (*S*) lesquelle est la propriété d'autres groupes d'hommes qui font partie de la nature.

Société(S) = Les Humaines (H) que ont besoin de la nature

Nature(N) = La nature a besoin de Humaines (H)

Cette opposition dans les deux catégories d'hommes comme partie de la Nature (*N*) et comme partie de la Société (*S*) est similaire à la relation proposée pour Marx (1867) sur le capitaliste et le travailleur. Il nous faut dépasser cette vision de dualisme pour nous rendre capables de comprendre la crise écologique actuelle. Maintenant le problème réside dans la séparation de la justice environnementale (Martínez Alier *et al.* 1987 ; Dupuy *et al.* 2015) d'avec la justice sociale. Pourtant, le problème de la *l'arithmétique verte* peut être résolu en mettre en place des liens entre les enjeux sociaux et les enjeux écologiques, Moore appelé cette association comme un *métabolisme singulier* des hommes dans le tissu de la vie (*Web of life*).

6.2 L'humanité dans la nature

6.2.1. Les systèmes socioécologiques (SSES)

Après avoir exploré les frontières entre l'économie et l'environnement, il nous semble intéressant d'aborder les études socioécologiques transdisciplinaires, lesquelles ont été réalisées par des auteurs issus de différentes disciplines. Ainsi, il existe plusieurs approches dans le cadre de la SSES, donc il n'y pas une approche exclusive ou un cadre commun unique pour l'étude des socioécosystèmes.

Par conséquent, cette partie se concentre sur les approches théoriques et épistémologiques posées par des auteurs comme Berkes *et al.* (1998), elle présente le concept et la définition générale des socioécosystèmes et leurs caractéristiques, d'autre part, elle met l'accent sur les études concernant l'influence de la théorie générale des systèmes et le paradigme de la complexité dans l'élaboration du cadre de SSES. Ainsi, compte tenu des socioécosystèmes et le système adaptatif complexe, il mettra l'accent sur les caractéristiques de ces systèmes et en particulier dans les cycles et les capacités d'adaptation.

Certaines approches spécifiques sont présentées comme une perspective d'approche dans la modélisation institutionnelle de la perspective de réseaux. Dans ce sens, le cadre de base des SSES réside dans l'hypothèse que les systèmes sociaux et écologiques sont étroitement liés et qu'il n'existe pas une délimitation des frontières dans la définition d'un écosystème ou d'un système social. De ce point de vue, les concepts que SSES ou *liens socioécologiques* sont utilisés pour mettre l'accent sur le concept intégré d'être humain en la nature (Berkes *et al.* 1998).

Ce concept ne peut être compris qu'à la lumière de son épistémologie de base sur une vision globale systémique. Ensuite, il faut commencer à partir d'un point de vue de l'écosystème (Berkes *et al.* 1998), dans lequel les êtres humaines ou plutôt, le système social sont explicitement inclus dans les écosystèmes (Odum, 1989) ; une vision qui est compatible avec l'écologie humaine de Park (1936) est également partagée avec la vue de nombreuses sociétés traditionnelles qui ont été considérées comme faisant partie de la nature.

Berkes *et al.* (1998) utilisent le terme anglais *système social écologique* par rapport à d'autres termes comme *éco- social* ou *socio -écologique* afin de donner un poids égal à la fois à la dimension sociale et au naturelle, parce qu'il a été supposé que les autres termes dans lesquels l'une des deux dimensions sont présentés avec le préfixe *éco* ou *partenaire* pourraient être mineur dans la logique de l'analyse l'ensemble (Folke *et al.* 2005). Par conséquent, dans ce travail, nous adoptons les conditions habituelles *socio - écosystèmes* ou *systèmes socio- écologiques.*

La vision intégrale de *système social écologique* dans laquelle les écosystèmes sont intégrés à la société humaine est également employée par le *Centre de Résilience de Stockholm*[78]. De plus, ces systèmes utilisent les multiples composants culturels, politiques, sociaux, économiques, écologiques, technologiques et leurs interaction, lesquelles peut être considérés comme constituant des SSES (Resilience Alliance, 2010).

Dans cette approche, les petites systèmes sont composées de différentes parties qui s'intègrent pour former une entité plus complexe. Dans ce cas, l'épistémologie reste comme une vision systémique et holistique au lieu de sa compréhension détaillée des parties, laquelle souligne quels sont les composants clé qui contribuent dans la dynamique de l'ensemble du système.

En raison des interactions socio-environnementales, nous pouvons caractériser la SSES à travers de (Berkes *et al.* 1998) :

- De nouveaux paramètres lesquelles apparaissent dans les SSES quand se génèrent les petits systèmes ;

- Les configurations peuvent s'auto-organiser ;

- L'adaptation est possible en eux.

Ces caractéristiques d'une part représentent un défi majeur pour la gestion des petits systèmes et d'autre part, c'est l'occasion pour une éventuelle réorganisation après la perturbation du système (Résilience Alliance, 2010).

Cette perception intègre la définition des *systèmes naturels – humaines couplée* (*CHNS*)[79] lesquelles représentant l'intégration entre les humaines et les composantes naturelles du système (Liu *et al.* 2007). Dont les caractéristiques sont : (1) la dynamique non linéaire avec le changement et la transition entre les états (2) les complexes boucles d'informations (3) les périodes de temps dépensées pour observer les conséquences (4) la résilience du système et (5) l'hétérogénéité du système (Liu *et al.* 2007) .

[78] *Resilience Alliance* est un réseau interdisciplinaire de chercheurs, qui analysent la dynamique intégrée entre des personnes et la nature du point de vue du système socio-écologique.
[79] CHNS est Coupled human and natural systems.

Il existe un consensus parmi les nombreux auteurs que l'élaboration du cadre des SSES, en grande partie a été dévélopée grâce aux progrès de la philosophie et de l'épistémologie des sciences pendant le XXe siècle et principalement grâce à la théorie générale des systèmes (TGS)[80] et le paradigme de la complexité (Morin, 1977 ; 1991a ; 1995 ; 2005).

Les SEES un paradigme complexe

La pensée complexe est la pensée qui va accepter la complexité, c'est-à-dire la contradiction. Dans ce sens, *l'Introduction à la pensée complexe* d'Edgar Morin propose une pensée qui relève les défis de la complexité afin de mieux comprendre nos personnes, notre humanité, notre monde.

Dans ce sens, les SSES se posent sous l'avant de la dichotomie *nature – culture* en raison du besoin de la gestion des relations socio-environnementales complexes dans une perspective holistique et systémique.

Ensuite pour connecter disciplines et pour concilier les unités de connaissances le concept de socio-écosystémique est proposé comme un cadre intégré pour l'étude de la réalité (Wilson, 1998). En effet, le paradigme complexité a été très utile de mettre en relation diverses disciplines des sciences naturelles et sociales et, par conséquent, pour comprendre la dynamique socio-écologique et ce qui est maintenant reconnu comme une partie de la SSES. Pour bien interpréter ce type du sujet, nous utilisons l'approche transdisciplinarité. Cette richesse de la trame peut également être considérée comme l'un de ses défis. Alors que les progrès du cadre nécessitent, entre autres, la discussion et le dialogue entre les différents points de vue afin de parvenir à une base transdisciplinaire commune des socios- écosystèmes qui soit acceptable pour tous les chercheurs impliqués.

Bien que le cadre soit à un stade préliminaire, il y a des défis sur la base duquel nous pouvons examiner, entre autres, choses, la résilience et la durabilité des systèmes. Aussi, nous pouvons nous servir dans le domaine des politiques de gestion et les processus de prise de décision pour réussir la durabilité du modèle. Il s'agit de changer le point de vue en incorporant une vision intégrée de la nature humaine, en tenant compte des processus de coévolution socio écologiques vers la cogestion adaptative et le renforcement de la résilience du système socio écologique à long terme.

L'avancement des sciences dans les dernières décades a permis la reconnaissance de la non- linéarité et de l'incertitude existante dans la plupart des processus qui se produisent dans l'écologie, l'économie, et de nombreux autres domaines (Berkes *et al.* 2003). D'abord, tout a commencé avec la théorie générale des

[80] Courant conceptuel initialement introduit par L. von Bertalanffy (1968) afin de rendre compte, dans un objet complexe ("système")

systèmes (Von Bertalanffy, 1968) laquelle a été développée conjointement avec la science de la complexité (Hollande, 1995, Levin , 1999; Kauffman, 1993; Costanza *et al.* 1993) .

Autrement dit que la pensée des systèmes complexes peuvent servir à articuler les sciences sociales et les sciences biophysiques (McIntosh *et al.* 2000). En vertu de cette pensée , les petits systèmes complexes présentent des caractéristiques telles que : (1) la non-linéarité (2) l'incertitude (3) l'urgence (4) l' échelle , et (5) l'auto-organisation (Berkes *et al.* 2003) . En partent de la même épistémologie l'historie de la théorie générale des systèmes et la théorie de la complexité donnent une réflexion sur les systèmes complexes (Glaser *et al.* 2008), ce qui est essentiel à l'étude des relations et des interactions des êtres humaines avec la nature.

Dans ce cadre d'étude pour adapter les hypothèses de la SSES aux systèmes complexes adaptatifs, une attention particulière est consacrée aux cycles d'adaptation et capacité d'adaptation des systèmes, pour suivi l'objectif de viabilité à long terme où les SSES se comportent comme des systèmes adaptatifs complexes (Walker *et al.* 2002). Mais malgré le degré élevé de complexité, la non-linéarité et la non-prévisibilité, ces systèmes ne sont pas aussi imprévisibles, en raison des cycles d'adaptation qui existent dans leur dynamique.

La métaphore des *cycles adaptatifs* découle d'abord du point de vue proposé par Holling (Holling, 1973, 1992). Mais aujourd'hui, il est indiqué que ces cycles adaptatifs sont applicables aux petits systèmes (Holling, 2001, Walker *et al.* 2002). De plus, les systèmes adaptatifs complexes ont du caractère évolutif, qui a été étudié à travers du concept de panarchie[81](Holling, 2001). Le panarchie explique la structure hiérarchique dans laquelle les petits systèmes sont quelques cycles d'adaptation de la croissance, l'accumulation, la restructuration et le renouvellement sans fin. Également, l'identification de ces cycles et leurs échelles peuvent servir à renforcer la résilience du système et de son chemin vers la durabilité (Holling, 2001). En raison de l'existence de ces cycles d'adaptation, la capacité d'adaptation des systèmes joue un rôle très important. Dans ce sens, l'enjeu de l'étude SSES réside dans la compréhension de leurs caractéristiques : (1) ceux qui causent la vulnérabilité dans le système, et (2) renforcer la résilience du système. Dans ce contexte, il ne fait aucun doute que la capacité d'adaptation du système joue un rôle important (Folke, 2006).

Dans le cadre existent des différentes approches de SSES qui correspondent aux principales approches de la perspective institutionnelle. Dans ce sens les SESS sont un système écologique qui est indissolublement lié et affecté par un ou plusieurs systèmes sociaux (Anderies *et al.* 2004). Autrement dit, la SSES présente un sous-ensemble de systèmes sociaux, où certaines relations et interactions qui se produites entre les êtres humaines lesquelles sont affectées par les interactions avec les unités biophysiques et biologiques non humaines.

Du point de vue institutionnel, l'une des clés du système social se trouve dans un cadre institutionnel qui exerce une influence sur les interactions entre les différents éléments socio-écosystémiques.

En outre, les SSES définissent les systèmes adaptatifs complexes, où les agents sociaux et biophysiques interagissent à différentes échelles temporelles et spatiales. Ils sont également du point de vue

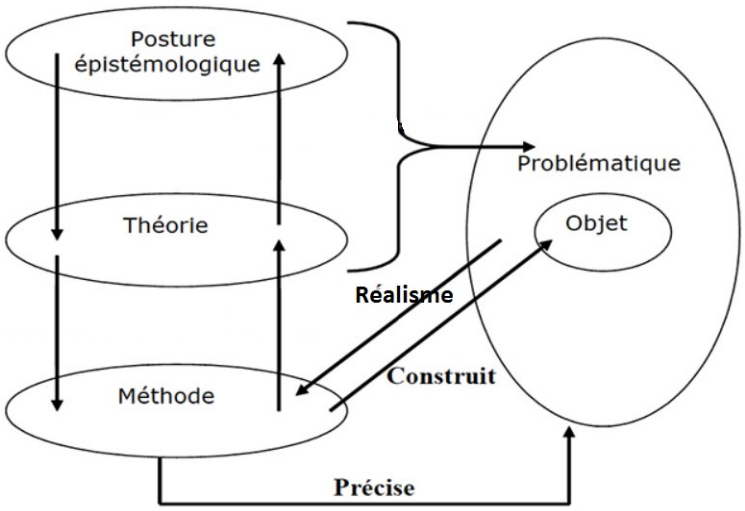
[81] La Panarchie est une méthodologie sociale basée sur le principe du volontarisme et la pratique de la tolérance.

institutionnel, les axés principalement sur l'étude de la gouvernance des petits systèmes (Janssen *et al.* 2006).

Une autre approche adoptée par certains auteurs, correspond à la nécessité d'appliquer des principes mathématiques à l'analyse des socio-écosystèmes lesquelles ressemblent le constructivisme[82] (figure 6.2.1). En raison de l'épistémologie qui forme la base des déclarations ci-dessus sures les SSES (Becker, 2010 et Jahn *et al.* 2009). Il faut focaliser l'attention sur la notion de *système*, cette notion indique que l'utilisation de théories et de méthodes qui viennent de la théorie des systèmes et de la complexité à travers de las quelles est possible d'avoir une définition mathématique du *système* (Becker, 2010). Par conséquent, un grand groupe d'auteurs, notamment ceux liés à la Centre de résilience de Stockholm, lesquelles perçoivent les SSES comme des systèmes concrets qui sont situés sur un monde réel avec une logique réaliste (figure 6.2.1) de l'espace et le temps.

Entre ces deux extrêmes du réalisme et constructivisme, Il existe une combinaison de réalisme ontologie qui s'appelle *modèle orienté de réalisme constructiviste* (Becker, 2010). Dans cette perspective, les petites systèmes sont considérées comme des *modèles de connaissance sur les phénomènes du monde réel* (Jahn *et al.* 2009 ; Becker, 2010).

Figure 6.2.1. Réalisme et Constructivisme



(Adapte de Mucchielli, 2006)

En effet, la SSES actuellement considérée comme des *objets frontières* , tels sont peu structurés il y a plusieurs interprétations pour l'explication et l'analyse dans le domaine transdisciplinaire et, par conséquent, il est nécessaire d'une restructuration était *objets épistémiques* (Becker, 2010). De plus, nous

[82] Le constructivisme est une théorie de l'apprentissage fondée sur l'idée que la connaissance est construite par l'apprenant sur la base d'une activité mentale. Le constructivisme est basé sur l'hypothèse que, en réfléchissant sur nos expériences, nous construisons notre propre vision du monde dans lequel nous vivons.

pouvons trouver d'autres approches telles que la perspective de réseau pour compléter les études empiriques sur les socioécosystèmes.

Pour représenter les SSES. Il est possible d'utiliser la *perspective de réseau* (Janssen *et al.* 2006), afin de mieux se concentrer sur les structures de relations et les interactions des composants du système. Ces réseaux sont constitués de nœuds et de connexions. Il est donc nécessaire de choisir les attributs essentiels du système qui doivent être reflété dans la structure d'un réseau. En ce cas, les nœuds symbolisent les composantes sociales et écologiques. Il existe aussi des différents types de connexion, comme humain-humain ou humain-espèces (cf. c. De plus, les nœuds et les connexions ne sont pas toujours actifs, mais peuvent être endormis, activés uniquement dans les situations de crise spécifique. Par conséquent, le maintien de la capacité à réactiver ces nœuds et les connexions dans le temps de crise est une contribution importante à la résilience du système. Également, ce système présente une caractéristique d'un système élastique quand un nœud ou un lien perd la capacité système de combler cette lacune dans le réseau avec de nouveaux nœuds et de connexion (Walker *et al.* 1999).

6.2.2. **Les visions des métabolismes**

Après avoir posé des questions de départ sur le dualisme nature/société et des systèmes socioécologiques, nous admettons la difficulté de plonger dans la phase exploratoire du sujet des relations nature/société, il peut être traité dans une approche dialectique donc il s'agit de repérer les contradictions des notions. Dans ce point, un résultat défini et admis pour tout le monde n'a pas encore été possible. Par ailleurs, l'État actuel des opinions ne présente pas moins des trois nuances suivantes :

- Une *première* opinion qui est défendue par nombre auteurs de l'écomarxisme et l'écosocialisme, entre autres pour John Bellamy Foster, Richard York, Brett Clark, Paul Burkett se distingue des autres en ce prend au cœur de la théorie marxiste de quoi forger une nouvelle interprétation en accord avec la relation entre la nature et le capitalisme (Moore, 2015; Klenoid, 2017). L'école de l'Orégon représentée pour John Bellamy Foster localise la question de la rupture du lien métabolique élémentaire ou *metabolic rift* (Foster *et al.* 2010; Moore, 2011) entre l'économie et la nature. Également, Paul Burkett (2011) a montré que la formation de la *loi de la valeur* repose non seulement sur la force de travail transformée en marchandise, mais aussi sur un autre type de *travail* : le travail de la nature. Toutefois, le travail de la nature ne saurait être valorisé sous le capitalisme ; il peut seulement être extrait ou mobilisé au service de la productivité du travail au sens capitaliste (la production de la valeur).

- Un second *groupe*, donc, on peut citer Mme. Fischer-Kowalski, distingue les limites des flux des matières et leur métabolisme (Fischer-Kowalski *et al.* 2007 ; 2011). Il s'agit ainsi de quantifier l'ensemble des flux de matières mis en jeu par le fonctionnement d'un territoire, en se focalisant sur la consommation directe de matière (DMC).

- Un troisième, dont M. Hardin peut être désigné comme le représentant typique du sujet des droits des biens communs. Le sujet comprend des contributions d'auteurs tels que Frank Knight,

Gordon Scott, Anthony Scott, Steven Cheung, Ellinor Ostrom et Gary Libecap entre autre. Toujours dans le célèbre article publié dans *Science* pour Garrett Hardin en 1968, lequel montre la logique qui génère finalement la tragédie. En ce sens, la tragédie des biens communs se réfère à la situation de dégradation de l'environnement devrait quand de nombreuses personnes utilisent une ressource commune laquelle est caractérisée par la difficulté d'exclure bénéficiaire et la rivalité de l'utilisation (Becker *et al.* 1995). En ce sens, la forte croissance de la population mondiale dans les derniers siècles évidence l'importance de la tragédie des biens communs pour une ressource naturelle d'exploitation continue et croissante (Hardin, 1968).

Le problème de la tragédie des biens communs se produit surtout dans le cas de ressources gratuites, définies comme ceux qui l'accès aux ressources épuisables, lesquelles sont caractérisées par la rivalité dans l'opération, ils sont donc soumis à l'utilisation et la possession de toute personne et par la capacité et le désir de les recueillir ou les supprimer sans aucune définition des droits de propriété *ex ante*. Dans ce scénario, les externalités négatives des produits peuvent être symétriques ou asymétriques (Stevenson, 1991). Dans ce sens, la tragédie des communs a été utilisée pour représenter des problèmes sociaux et économiques y compris la gestion des ressources naturelles illustrée dans des cas tels que le pâturage, les pluies acides ou la gestion de la pêche (Ostrom , 1990). Par conséquent, la tragédie des biens communs est un point de départ approprié pour intégrer le rôle des institutions dans la gestion des ressources naturelles dans une approche économique néoclassique.

Une première étape consiste à envisager une institution fondamentale des droits de propriété passons en revue quelques-uns des principaux arguments. Le problème des biens communs qu'implique la nécessité d'une solution institutionnelle pour éviter la tragédie. La solution pour régler le problème est abordé pour Hardin, lequel note l'existence de plusieurs options telles que des biens privés ou publics (Hardin, 1968). La vérité, c'est qu'aujourd'hui les droits de propriété sont considérés comme beaucoup plus complexes que ce qui était traditionnellement dans la société considéré comme institutions (Libecap, 1999).

Dans chaque société, il doit y avoir des mécanismes qui restreignent le libre accès à du capital humain et des ressources naturelles non - humaines. Ces mécanismes impliquent une répartition des droits de propriété, compris comme les capacités des individus à faire des choix sur les ressources. L'exercice des droits de propriété implique d'exclure d'autres personnes qui utilisent les ressources rares (Eggertsson, 1990). En ce sens, les droits de propriété servent à contrôler l'accès et l'utilisation des ressources notamment pour éviter les pertes de la tragédie des communs.

Ensuite, les droits de propriété se réfèrent à l'ensemble des relations que gère le comportement entre les opérateurs dans l'utilisation des ressources de valeur. Elles utilisent la définition d'accès et d'utilisation des ressources naturelles pour définir la nature du marché des transactions et les relations de travail au sein des entreprises. Les droits de propriété définissent des normes de rendement pour l'attribution et l'utilisation des ressources affectant ainsi la gestion des ressources naturelles (Libecap, 1999). En conséquence, les propriétés des ressources peuvent être

comprises comme un ensemble de droits et d'obligations pouvant être exercés sur eux (Libecap, 1999).

Dans le cadre juridique, la propriété d'un actif selon d'article 516 du Code civil[83], se compose de trois éléments : le droit d'utiliser l'actif (*usus*) , le droit de s'approprier les rendements de l' actif (*fructus usus*) et le droit de changer de forme, la substance et la situation (*abusus*) .

Le vecteur de la propriété des ressources naturelles distingue cinq types de droits (Schlager *et al.* 1992):

A) Le droit d'accès, à savoir, le droit d'entrer dans une propriété physique particulière ;
B) Le droit de retrait , c'est à dire , le droit d'obtenir des produits d'une ressource ;
C) Le droit de gestion, à savoir , le droit de réglementer les normes d'utilisation interne et transformer la ressource en apportant des améliorations ;
D) Le droit d'exclusion, c'est le droit de déterminer qui a le droit d'accéder et comment ce droit peut être transformé ;
E) Le droit de l'aliénation ou la transférabilité, c'est-à-dire le droit de vendre ou de louer.

Comme l'indique Harold Demsetz dans son ouvrage de 1967, il est clair alors que les droits de propriété précisent comment les gens peuvent profiter ou nuire. C'est pour cette raison que l'on se demande, qui doit payer pour modifier les actions qui sont effectuées par les gens. Cette reconnaissance conduit facilement à la relation étroite entre droits de propriété et les externalités. A la limite, si les droits de propriété sont bien définis ainsi que les avantages nets privés et sociaux sont égaux, nous sommes dans un scénario sans externalités.

Finalement, les droits de propriété peuvent être privé, public ou même sortir de mécanismes de la communauté sociale liée au commun (Ostrom, 2008). En ce sens, les prévisions de Scott Gordon (Gordon, 1954) sur la tragédie des communs dits, si les participants ne sont pas anonymes et peuvent communiquer dans ce cas et la communauté peut définir ses propres règles et même le système de sanction. De plus, il y a eu des systèmes de gouvernance locale qui ont évité la tragédie de la ressource commune, mais il y a d'autres questions critiques au-delà de la nature locale, telles que le changement climatique ou la déforestation dans les tropiques (Dietz *et al.* 2003). Par conséquent, la solution de la communauté locale ne suffit pas et nous avons besoin de construire une approche institutionnelle intégrée incorporant une approche des institutions plus larges et plus profondes lesquelles ne se limitent pas aux droits de propriété dans la vision de sens classique. Pour ce faire, ce sont des notions théoriques clés des *coûts de transaction.*

6.2.3. **Les formes d'appropriation et d'accumulation**

Dans cette partie nous voulons revenir sur la justification des discours du marxisme écologique. D'abord, il faut distinguer deux formes d'appropriation. Le premier correspond à la manière dont on utilise et entretien dans les processus biophysiques de reproduction des ressources comme la force de travail, la

[83] Créé par Loi 1804-01-25 promulguée le 4 février 1804

forêt et l'agriculture. Dans ce cas, nous rentrons dans la discussion s'il faut considérer les humaines ou la force de travail comme partie de la nature ou les cycles biophysiques naturelles. Moore en 2015 fait une série d'observations sur ce sujet de la théorie de Marx contenu dans *Le Capital*, chapitre V. D'abord, il dit que les humaines font partie de la nature et que leur activité vitale est une *force de la nature*.

Deuxièmement, dans cette activité vitale les humaines transforment les éléments contenus dans les cycles biophysiques en *inputs* de l'économie. Cette double transformation – des rapports sociaux humaines et des rapports au sein de la nature externe – implique une troisième : la transformation continue des rapports entre les humaines et le tissu de la vie.

À travers de cette transformation le travail produit une variation de l'énergie qui permettra d'alimenter un processus de création de valeur économique. Donc, il y a une relation travail/énergie ou *work/power*. Le second usage correspond à l'extraction géologique de matière et l'énergie. Dans ce cas, nous explorons la discussion sur le *pic d'appropriation,* il s'agit de la réduction de la valeur des ressources stratégiques pour le système économique. Également, cette variation réduit le cout de processus d'appropriation en produisant le pic en la quantité qui a été approprié.

En ce qui concerne à l'accumulation du capital, il fonctionne à travers de deux stratégies d'accumulation. L'une est l'accumulation par capitalisation, centrée sur *l'exploitation* de la force de travail : la production de la valeur au sein du circuit du capital. L'autre concerne l'accumulation par appropriation, centrée sur *l'appropriation* du travail non payé : le travail non payé des humaines et le travail non payé des natures qui se reproduisent à l'extérieur du circuit du capital.

6.3 La frontière entre le capitalisme historique et la nature

6.3.1 Le capitalisme historique

Tout d'abord, ce type de processus d'expansion et d'appropriation de la biosphère s'est exprimé de la façon la plus dramatique dans la conquête des Amériques pour les puissances européennes (Moore 2010a, 2010b). Le Nouveau Monde est alors devenu, une continent vierge, donc sans un système de régulation et un terrain propice au développement du capitalisme industriel.

Cette appropriation a commencé avec les plantations de sucre et l'exploitation minière. Les propriétaires de l'économie ont a mis en place de grandes opérations de production, au moyen de nombreuses machines, on a écoulé beaucoup d'argent, ils ont soumis les travailleurs au temps et à la tâche, et tout cela afin de s'approprier le travail de la nature gratuitement ou à très bas prix pour pouvoir en tirer quelque chose qui puisse s'acheter et se vendre.

Cela a détruit les sols et les zones montagneuses des Andes par exemple, qui étaient complètement dépourvus d'arbres, entrainant par là une terrible érosion du sol. Mais des conséquences désastreuses qu'ont également suivies pour les humaines impliqués dans ce processus. Dans la vice-royauté du Pérou, par exemple, aux 16e et 17e siècles, les Castillans et les Espagnols avaient une expression spéciale pour désigner les indigènes : *los naturales*. Ces travailleurs et indigènes étaient considérés comme appartenant à l'ordre de la nature (Moore, 2015).

Nous pouvons trouver le même type de phénomène avec l'esclavage des Africains. Le développement du commerce des esclaves est inséparable des plantations de canne à sucre et cela est très révélateur : non seulement on s'est approprié les sols et les forêts du Nouveau Monde et on les a exploité jusqu'à l'épuisement, mais les esclaves africains eux-mêmes ont été traités comme constituant une partie de la nature et non comme des hommes appartenant à une société. Les propriétaires de l'économie se sont approprié sans distinction entre le travail des Africains et le travail des sols et des forêts. C'est sur cette base qu'un nouveau rapport à la nature a émergé, et ce rapport n'est pas sans lien avec l'économie.

Chaque fois que de nouveaux empires se sont constitués, l'empire des Portugais sur le Nouveau Monde et l'océan Indien, celui des Allemands, des Espagnols, la première initiative était la collecte de tous les biens naturels qu'on pouvait trouver, incluant les hommes, et leur codification, leur rationalisation. Ainsi, le monde présente des processus extraordinaires de mobilisation de travail non payé au service de la production et de l'échange de marchandises. La première chose que souhaite tout capitaliste ou tout pouvoir colonial, c'est d'investir une petite quantité d'argent, et d'en obtenir en retour une grande quantité d'énergie, sous forme d'argent, de sucre et plus tard avec la Révolution industrielle de tabac et de coton. C'est sur le même type de processus que toute avancée technologique s'appuie : la mise en place de nouveaux moyens d'obtenir gratuitement ou à bas prix, à grande échelle, les fruits du travail de la nature. Pour plus de détails, dans l'annexe VI.A sur la grille de lecture historique de *fourth cheaps*.

6.3.2 Les matières premières pas chères ou *fours cheaps*

Tout d'abord, le processus d'appropriation du capital naturel utilise quatre *inputs* fondamentaux comme la main-d'œuvre, l'alimentation, l'énergie et les matières premières. Moore appellent ces quatre composants comme *fours cheaps.* L'utilisation synchronisée des quatre composants parvient à générer et entretenir une dynamique productive vertueuse, qui génère des profits croissants. De plus, la diminution de la synchronie d'utilisation des fours cheaps commence à se dégrader vers une dynamique d'accumulation.

Dans le langage de Moore (Moore, 2015) quand les *fours cheaps* cessent d'être pas chers et commencent à être cher, les possibilités d'accumulation dans la zone de la production matérielle, et commencent à se contracter vers la zone expansions financière comme dans *les* cycles *systémiques d'accumulation* d'Arrighi (Arrighi, 1994), chaque fois que le système se contracte vers la zone expansions financière un nouvel empire sera constitué.

Pour résumer, la tendance du siècle dernier a été de dissoudre les frontières entre chacun des fours cheaps, pour rester dans une phase d'accumulation, en particulier entre l'alimentation, l'énergie et les matières premières, qui sont devenues de plus en plus interchangeables au cours des dernières décennies. Cette tendance devient plus compliquée dans le lien entre l'alimentation / la main-d'œuvre parce que la nourriture et le travail pas cher sont à la fois déterminés par les prix et coûts des matières premières des processus agricoles qui ne sont pas fortement interchangeables (Moore, 2015). Un autre moment de cette dissolution des frontières entre les *fours cheaps* se trouve dans la nouvelle phase de la financiarisation après l'année 2000. Dans cette phase les marchés de matières premières du monde étaient *financiarisés* et *numérisés* en augmentant leur volatilité des prix (Moore, 2015).

Tableau 6.3.2 : Grille de lecture de *Fourth cheap*

	Reproduction est autonome de la circulation du capital 1450-1750	Appropriation des ressources non-renouvelables et d'énergie L'environnement est considéré comme exogène 1800-2000	L'environnement est internalisé et financiarisé 1971-present
Force de travail	La dialectique entre les natures humaines et extrahumaines, Moore l'appelle l'*oikeios* (Hughes, 1994). Les producteurs et les moyens de production sont ensembles (pouvoir seigneurial).	Une augmentation de la population Le primat des causes sociales plutôt que celui des rapports socio-écologiques. La séparation des producteurs directs d'avec les moyens de production et la liquidation progressive du pouvoir seigneurial à la campagne. Le bourgeois et le prolétaire émergent comme expression relationnelle entre la valeur d'échange et la valeur d'usage. Clark et York (2005a) montrent que la valeur représente une appropriation aliénée de la nature humaine.	Dichotomie du travail et de la nature du côté du concept de *travail-dans-la-nature* (Araghi 2009). La mondialisation des rapports de valeur. La pénétration à grande échelle du capital financier dans la reproduction globale de la nature, humaine et extra-humaine représente une nouvelle phase des rapports nature-société. La stagnation de la hausse de la productivité du travail.
Alimentation	La tendance principale du premier capitalisme, des années 1450 au début du XIXe siècle, a été la sous-production et les flux insuffisants de nourriture bon marché.	Ruptures historiques successives dans le cycle alimentaire et la consommation en hausse (Foster 1999 et Moore 2002a). La rupture métabolique dans l'engagement de l'humanité avec le *tissu de la vie (web of life)*. La domination de l'humanité par la société bourgeoise repose sur sa *domination de la terre* , en particulier sous la forme de propriété foncière à grande échelle (Foster 2000) qui se traduit dans la révolution agraire.	Les longs siècles d'accumulation successifs ont vu le jour à travers de nouvelles cristallisations comme les révolutions agraires aux nouveaux centres de la finance mondiale. La compression de l'*espace-temps* immanente au besoin du capital(Harvey 1982, 1989) et l'accélération de la production de la nature, la croissance accélérée des saumons et la traite plus rapide des vaches manipulées par piqûres.
Énergie	La sous-production d'énergie. Analyse l'impact du capitalisme sur l'environnement.	Energie bon marché en abondance. Analyse le rapport de reproduction entre l'accumulation infinie et la production infinie de la nature.	Hausse des prix d'énergie. Les deux manières du concept de *crise*, d'abord la transition d'un mode de production à un autre (crise d'époque) et, pour illustrer les transitions d'une phase du capitalisme à une autre (crises de développement) comme le réchauffement climatique (Monbiot 2006), le pic pétrolier (Heinberg 2003) et la financiarisation à la hausse des coûts de production.
Matière première	La dichotomie cartésienne des termes nature et société (Haila et Heininen, 1995). La sous-production de matières relatives aux demandes de la production de valeur. L'accumulation par dépossession du colonialisme.	La nature est le site de l'histoire environnementale. Approche méthodologique qui abandonne les biais de la dichotomie cartésienne. La théorie de la rupture métabolique (école de l'Orégon) à travers de l'appropriation d'un tiroir, et l'accumulation du capital dans un autre. L'épuisement des ressources et la pollution biophysique accroissent la loi générale absolue de la dégradation environnementale de Foster (1992) à travers des ruptures dans l'engagement de l'humanité avec le tissu de la vie (web of life).	Clark et York (2005a), dissolvent la dialectique de la ville et de la campagne en une particularité au sein d'un tout général en montrant l'accaparement de la nature par le capitalisme. La construction d'une crise écologique, extinction des espèces (Leakey et Lewin, 1995) qui serait provoquée par l'accumulation du capital. La nature globale *oikeios* est devenue dépendante d'un circuit du capital qui est superficiel.

6.3.3 Le système du capitalisme cyclique ou d'accumulation.

Comme nous avons vu dans le capitalisme historique de Jason Moore, Giovanni Arrighi (Arrighi, 1994) a proposé que le capitalisme a connu depuis ses origines au XV^{e} siècle quatre longs *cycles systémiques d'accumulation*. Chaque cycle est composé de deux phases, pendant la première phase, un ensemble d'acteurs économiques privés, en collaboration avec des structures étatiques, parvient à générer et entretenir une dynamique productive vertueuse, qui génère des profits croissants. Avec le temps, cette dynamique vertueuse commence à se dégrader vers une phase financière. Donc, la loi des rendements décroissants commence à s'appliquer et chaque fraction du capital investi génère un profit moindre. En ce moment le cycle systémique d'accumulation entre dans sa phase financière.

Chaque cycle systémique est constitué d'un centre qui s'accroit jusqu'au moment le capital investi génère un profit moindre. De plus, les centres identifiés par Arrighi sont Gênes (qui a dominé du XV^{e} au début du XVII^{e} siècle), les Pays-Bas (de la fin du XVI^{e} à la fin du XVIII^{e}), la Grande-Bretagne (de la moitié du XVIII^{e} à la moitié du XX^{e}) et les États-Unis (de la fin du XIX^{e} à nos jours). Finalement, selon Arrighi (2009), la Chine est appelée à s'imposer comme le nouvel *hegemon* au cours du XXI^{e} siècle.

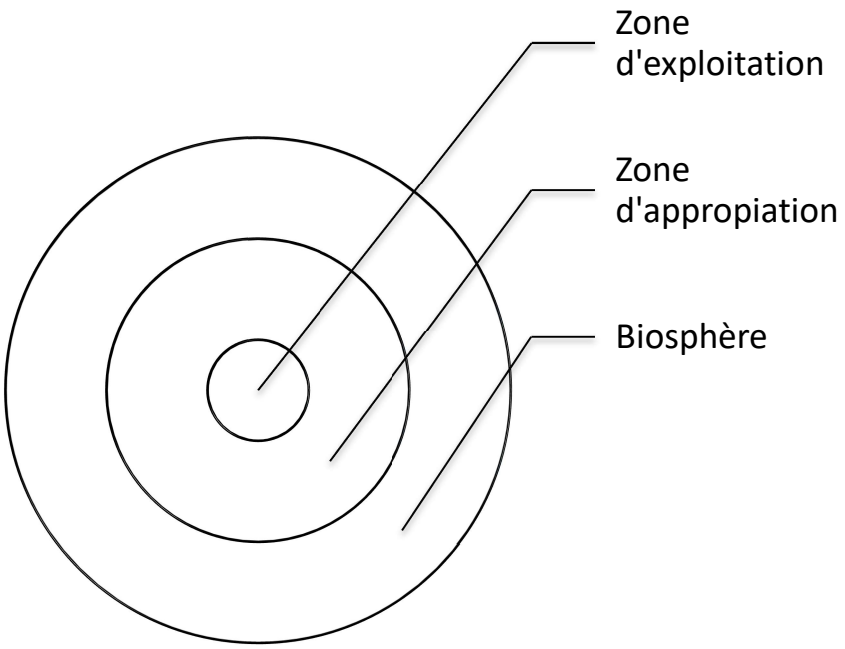
6.3.4 La configuration du système capitaliste

D'après cette vision d'Arrighi et Moore, le capitalisme peut être le cadre dans cette nouvelle configuration dans la tissu de la vie ou *web of life* qui peut être associé au changement dans le concept d'*oikeios* ou ensemble de biens et d'hommes rattachés à un même lieu d'habitation et de production.

Au cœur de cette nouvelle définition réside l'idée centrale d'une nature qui serait extérieure aux rapports humaines, qui serait pure, inaltérée ou saine et indépendante des désirs de l'être humain. Donc, nous pouvons revenir vers la vision de Braudel et de Wallerstein pour expliquer cette structure du centre et de la périphérie. En parlant de cette définition allongée d'*oikeios*, le système est composé de multiples écosystèmes en partant du centre vers la périphérie. Également, les hommes dans le centre étant donné qu'ils utilisent sans cesse leur propre environnement, produisent en même temps leurs propres structures de pouvoir de gouvernance sur les frontières et de production (et surtout les structures de reproduction du capital).

A l'intérieur du centre de notre système, le capitalisme considère le travail humain comme un bien ou ressource qui se trouve à l'intérieur du système marchand ou système de valeur en échange dans la zone d'exploitation. De plus, dans la conception marxiste, le travailleur travaille quatre heures pour toucher son propre salaire comme rémunération des facteurs de production et quatre heures supplémentaires par le capitaliste.

Figure 6.3.4 : Adaptation de *word system theory*



Source: L'auteur

Le passage de la zone d'exploitation vers la zone d'appropriation de la biosphère nécessitée d'un système de régulation dans la figure 6.3.4. Dans ce sens, le problème du capitalisme aujourd'hui est que les opportunités d'appropriation des biens de production qui se trouve proche des leurs frontières dans la zone d'exploitation se réduisent drastiquement, alors même que la masse du capital parcourant le monde à la recherche de lieux à investir est de plus en plus grande. Le système de régulation n'est pas capable de contrôler les frontières de l'investissement et d'appropriation du capital écologique.

Le capitalisme commence à dépasser ou à élargir leur domaine vers la biosphère. John Bellamy Foster dans leur ouvrage *Marx's Ecology : Materialism and Nature* (2000) propose deux parcours parallèles dans l'élargissement du capitalisme. D'une part, le monde court à sa fin : c'est l'idée d'apocalypse planétaire ou épuisement écologique. D'autre part, l'idée que le capitalisme se confronte de plus en plus aux problèmes de la sous-consommation des ressources dans quelques parties de la planète et de l'inégalité sociale dans la distribution des ressources et des produits. Pour donner des solutions, nous devons intégrer les deux dimensions du sujet, en intégrant l'écologie à l'analyse de l'inégalité sociale. Cependant, selon Moore (2015), le capitalisme a été mesuré dans une dimension. C'est-à-dire, à partir de la productivité du travail au sein des rapports monétaires, ce phénomène réduit et simplifié le travail des humaines et dévalue la valeur de la nature à travers du concept de *cheap nature*. Dans ce sens, l'appropriation d'un travail et de la *cheap nature*, fait partie intégrante de la procédure du capitalisme.

6.3.5 Les limites du capitalisme dans la nature et le paradigme de l'économie circulaire

Comme a été déjà mentionné au début du chapitre, nous assistons au changement des frontières entre l'économie et l'environnement. Etant donné que les derniers siècles notre système économique et productif a augmenté leur consommation et que nous avons généré un impact sérieux sur le système biogéophysique on parle d'une nouvelle ère géologique appelée anthropocène (Crutzen, 2002). De plus, nous pouvons distinguer deux usages de ce terme. Le premier correspond à la manière dont on utilise le concept d'anthropocène lors d'une discussion qui se veut culturelle. Donc, comment les humaines s'inscrivent-ils dans le web of life ? Le second usage, le plus important, correspond à comment le capitalisme a su largement augmenter sa capacité pour transformer l'environnement dont c'est le modèle post révolution industrielle anglaise. En un sens historique cependant, il s'agit là d'une dynamique sociohistorique qui apparaît aux 15e, 16e, et 17e siècles à travers la manière dont les paysages et les hommes se sont transformés en facteur de production.

L'anthropocène comme une nouvelle ère sur la terre est marquée par des effets graves et les étendues de dégâts ont été introduites et sont introduites dans la planète. La détérioration des diverses ressources naturelles et la perte de la biodiversité sont des réflexions de cette réalité. Selon le rapport de l'évaluation de l'écosystème du millénaire (MEA)[84] au cours des 50 dernières années, les humaines ont modifié les écosystèmes plus rapidement et plus profondément que toute autre période comparable de l'histoire de l'humanité. Ces changements apportés aux écosystèmes ont contribué à des gains nets substantiels en termes de *bien - être* et le développement économique de l'homme, mais ces gains ont été réalisés à des coûts croissants de la dégradation de nombreux services fournis par les écosystèmes et l'exacerbation de la pauvreté pour certains groupes de population (MEA, 2005).

Autrement dit, le processus d'évolution des systèmes culturels dans les derniers siècles, en particulier après la révolution industrielle, a changé de nombreux aspects du métabolisme entre la société et la nature ; tels que l'évolution socioculturelle est devenue une force macro évolutive (Gowdy, 1994). Ce type de processus de coévolution entre le système écologique et le système socio biophysique économique et culturale (Gowdy, 1994; Norgaard, 1994; Gual et Norgaard, 2010) a été ignoré par la pensée scientifique et économique, ainsi que les différentes institutions de prise de décision. Le défi d'inverser la dégradation des écosystèmes tout en répondant aux demandes croissantes de leurs services peut être partiellement atteint dans certains cas envisagés par l'évaluation, mais il exige des changements importants sont apportés dans les politiques, les institutions et les pratiques changements qui ne sont pas en cours d'exécution (MA, 2005).

Au niveau universitaire, cela nécessite d'autres études et d'analyse des cadres, sur la base d'une vision inclusive de l'ensemble du système. De plus, le rejet de l'étude des processus coévolutionnaires et relations socioécologiques dans les crises consolidés parfaitement à la base du rationalisme cartésien et le paradigme scientifique occidental.

[84] Millenium Ecosystem Assesment (MEA) a été appelé par le Secrétaire général des Nations Unies Kofi Annan en 2000. Le MA a impliqué le travail de plus de 1360 experts du monde entier. Leurs conclusions, qui figurent dans cinq volumes techniques et six rapports de synthèse, fournir une évaluation scientifique state-of-the-art de l'état et les tendances des écosystèmes de la planète et les services.

Ce paradigme de simplification repose sur la disjonction, la réduction et l'abstraction (Morin, 1991b), avec ses principes de l'interdisciplinarité et la particularité, il y a eu de grandes avancées scientifiques dans les différents domaines; mais en même temps, donné lieu à un rapprochement partial et limité de la réalité, entre autres. Il a séparé en trois grands domaines de la connaissance scientifique : la physique, la biologie et la science de l'homme (Morin, 1991b). Ainsi, toutes les relations et rétroactions entre les sous-systèmes sociaux et biophysiques nécessitent une approche interdisciplinaire. Cependant, il a été traité seulement sur des cadres mono disciplinaires d'étude et d'analyse. Autrement dit, le progrès délibéré avec l'objectif de viabilité à long terme dépend de la compréhension de la dynamique qui se produit entre les systèmes sociaux et écologiques (Cumming *et al.* 2005). Par conséquent, l'approche de la gestion des écosystèmes et des ressources naturelles ne devrait pas se concentrer sur les composants du système, mais dans leurs relations, les interactions et rétroactions.

La situation actuelle nécessite, entre autres, la réconciliation entre les sciences sociales et naturelles, et de nouveaux cadres d'analyses fondées sur une perspective holistique. À savoir les controverses écosociales qui nous sont confrontées, plutôt que le sujet systémique nécessite des paradigmes alternatifs basés sur une vision intégrative de l'ensemble du système. Cette démarche permettra d'éclaircir l'*asymétrie* en la négociation dynamique des frontières entre l'économie et l'environnement comme cela a été décrit dans le livre *Is Capitalism sustainable?* (O'Connor, 1994).

Ce mécanisme d'*instrumentalisation* (Klenoid, 2017) considère deux étapes : l'*internalisation* de la nature dans le système de valeur, l'*externalisation* des déchets et l'*élargissement* des frontières de l'exploitation. Le mécanisme revendique le concept de la *valeur d'usage* de Marx qui intègre la nature dans le système de production capitaliste et instrumentalise les processus écosystémiques qui ont été jusqu'à présent autonomes. Dans ce sens, le *paradigme* de l'économie circulaire fonctionne en même temps, comme une partie du système d'*instrumentalisation* de l'environnement et comme une partie du système de protection de la nature.

Finalement, dans ce double parcours de l'économie circulaire. La création d'un processus de traitement et valorisation du déchet peut offrir un revenu aux propriétaires du processus. Donc, la *société de consommation*[85] instrumentalise la nature, utilise les intrants naturels, jette et recycle les déchets des processus pour génère un surplus. Mais le système peut élargir le périmètre vers le travail humain comme ressource productive. Herbert Marcuse (1968) représentant de la deuxième génération de *l'École de Francfort* de sociologie critique, analyse l'*internalisation* et l'*instrumentalisation* de travail humaine. En adition, les êtres humaines participent aussi dans le système comme consommateurs (Galbraith, 1958). Dans ce sens, la revenue qui a été donnée à la force de travail sera dépensée au même système circulaire.

[85] *The Affluent Society* ou societe de consommation de 1958 a été ecrit pour John Kenneth Galbraith. Cet ouvrage a contribué à la diffusion du concept de *société d'abondance* aux Etats Unis.

CONCLUSION DE LA PARTIE III

Le chapitre VI a présenté, d'un côté, le processus d'expansion et appropriation de la biosphère, dont le capitalisme historique, il s'est exprimé de la façon la plus dramatique dans la conquête des Amériques pour les puissances européennes (Moore 2010a, 2010b). Ce type de processus d'appropriation du capital naturel utilise quatre *inputs* fondamentaux ou *fours cheaps* comme la main-d'œuvre, l'alimentation, l'énergie et les matières premières. L'utilisation synchronisée des quatre composants parvient à générer et entretenir une dynamique productive vertueuse, qui génère des profits croissants.

D'un autre côté le chapitre analyse les cycles systémiques d'accumulation selon la pensée de Giovanni Arrighi. Cette vision permettait de donner une configuration du système capitaliste dans la tissu de la vie ou *web of life* peut être associé au changement dans le concept d'*oikeios (*Moore, 2015; Kleinod, 2017). Au cœur de cette nouvelle définition réside l'idée centrale d'une nature qui serait extérieure aux rapports humaines, qui serait pure, inaltérée ou saine et indépendante des désirs de l'être humain.

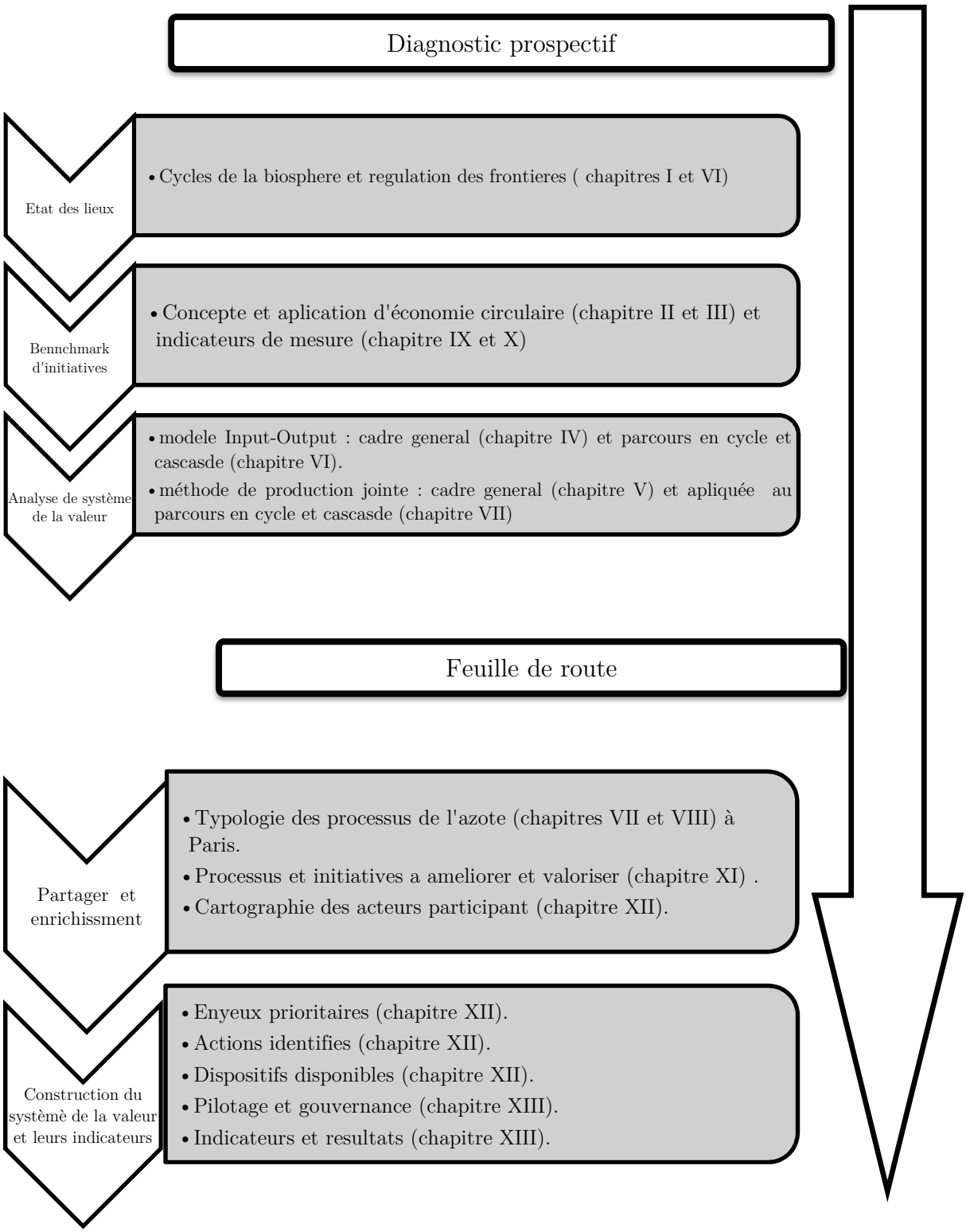
Vers la fin de ce chapitre a été présenté le mécanisme d'instrumentalisation de la nature qui a été déjà décrit au chapitre cinq de la thèse, considère deux étapes : l'internalisation de la nature dans le système de valeurs, l'externalisation des déchets et l'élargissement des frontières de l'exploitation.

Finalement la partie IV utilisera le cadre comportant de trois dimensions pour explorer une vision théorique du sujet de la thèse.

PARTIE IV.- APPROCHE DE LA MODELISATION ECONOMIE CIRCULAIRE : INDICATEURS

Rien ne nait ni ne périt, mais des choses déjà existantes se combinent, puis se séparent de nouveau.
Anaxagore, philosophe grec.

Les éléments méthodologiques développés dans cette seconde partie sont résumés dans le logigramme ci-contre, qui montre les étapes, successives ou simultanées, permettant d'élaborer sa stratégie d'économie circulaire.



7. LES APPROCHES BIOPHYSIQUES DU MODELE INPUT-OUTPUT : INTERFACE ECONOMIE -ENVIRONNEMENT

DANS CETTE VISION, CETTE THESE PROPOSE UNE TYPOLOGIE de quatre structures input-output du système pour formaliser les relations économiques physiques.

- Tableau Input-Output (I/O) de l'environnement : Deux processus et deux commodités.
- Tableau I/O de l'environnement : Deux processus et deux commodités en considérant les déchets.
- Tableau I/O de l'environnement : Deux processus et deux commodités en considérant la production des déchets et le recyclage de la matière.
- Tableau I/O de l'environnement : Deux processus et deux commodités en considérant la production des déchets et le recyclage de matière et de l'énergie.

Par la suite, le modèle I/O de Yifang *et al.* (2007[86])sera utilisé comme cadre de base pour faire une typologie des *cycles* et des *cascades*.

7.1 Tableau Input-Output de l'environnement (EIO): Deux processus et deux commodités

Le modèle de deux processus intègre les relations et échanges entre la production de biens écologiques dans l'environnement et la consommation de biens écologiques dans l'économie. Dans un tableau de type *commodity by industry* présenté par Isard (1968) et réutilisé plus tard par Victor (1972), cf. chapitre IV.

La structure peut être définie comme le flux linéaire (cascade) qui consomme des ressources pour produire des biens. Ce modèle se fonde, sur les variables suivantes :

x_{ij}^{pp} Les inputs intermédiaires par industrie(p) et par produit écologique (p): un élément x_{ij} de cette matrice représente l'input du produit écologique i consommé par l'industrie j (i= 1, ..., n; j= 1, ..., n).

[86] Le modelé *input-output* de Liu Yifang a été montre dans le *16th International Input-output Conference in Istanbul, Turkey, 2-6 July 2007* .

x_i^{pc} Les inputs intermédiaires par industrie(c) et par produit écologique (p): un élément x_i de cette matrice représente l'input du produit écologique i consommé par l'industrie j (i= *1, ..., n ; j= 1*).

x_j^{cp} Les inputs intermédiaires par industrie(p) et par produit écologique (c): un élément x_j de cette matrice représente l'input du produit écologique i consommé par l'industrie j (i= *1 ; j= 1, ..., n*).

x_{ij}^{cc} Les inputs intermédiaires par industrie(c) et par produit écologique (c): un élément x_{ij} de cette matrice représente l'input du produit écologique i consommé par l'industrie j (i= *1, ..., n; j= 1, ..., n*). Dans cet exemple $x_{ij}^{cc} = 0$

Y_i^p Un élément Y_i de cette matrice représente la demande finale pour le produit écologique i par la catégorie de demande finale p (i= *1, ..., n*).

X_i^p Un élément X_i de cette matrice représente l'output en produit écologique i fabriqué par l'industrie p (i= *1, ..., n*).

Y^c Un élément Y de cette matrice représente la demande finale pour le produit écologique i consommé par la catégorie de demande finale p (i= 1).

X^c Un élément X de cette matrice représente l'output en produit écologique i fabriqué par l'industrie p (i= 1).

V_j^p Un élément V_j de cette matrice représente les dépenses industrielles en input primaire par l'industrie p (j= *1, ..., n*).

V^c Un élément V de cette matrice représente les dépenses industrielles en input primaire par l'industrie c (j= *1*).

X_j^p Un élément X_j de ce vecteur, obtenu en sommant les éléments de la colonne j des secteurs de production, représente un facteur productif total comme le travail consommé pour l'industrie de secteur j (j= *1, ..., n*).

X^c Un élément X de ce vecteur, obtenu en sommant les éléments de la colonne j des secteurs de consommation, représente un facteur productif comme le travail consommé pour l'industrie j (j= *1*).

7.1.1 Tableau I/O des deux processus et deux commodités

			Demande intermédiaire			
			Secteur de production	Secteur de consommation	Demande Finale	Sorties Totales
			1,K ,n	1		
Input	Production des biens	1 K n	x_{ij}^{pp}	x_i^{pc}	Y_i^p	X_i^p
	Consommation des biens	1	x_j^{cp}	x_{ij}^{cc}	Y^c	X^c
Intrants primaires			V_j^p	V^c		
Intrants totaux			X_j^p	X^c		

Source : L'auteur

7.2 Tableau EIO : Deux processus et deux commodités en considérant les déchets

Le modèle de deux processus intégrer un tableau de type *commodity by industry* qui a été présenté par Isard (1968) et réutilisé plus tard par McDonald (2005). Dans le modèle d'Isard, un secteur économique peut émettre plus d'un polluant et un secteur écologique peut échanger avec un autre secteur écologique. Ce qui permettre de prend en compte les émissions des polluants en utilisant l'économie ou la nature comme une structure de soutien physique donc *fond*.

La cascade peut être définie comme un flux linéaire de production des biens, consommation des biens et production du déchets. Le modèle se fonde sur les mêmes variables du modèle 2x2 ci-dessus plus les variables qui présentent les déchets:

x_{ij}^{pd} Un élément x_{ij} de cette matrice représente le rejet dans l'environnement (Fond) du produit écologique *i* stocké par l'industrie *j* (*i= 1, ..., n ; j= 1, ..., m*).

x_j^{cd} Un élément x_{ij} de cette matrice représente le rejet dans l'économie (Fond) du produit écologique *i* stocké par l'industrie *j* (*i= 1 ; j= 1, ..., m*).

s_{ij}^p Un élément s_{ij} de cette matrice représente le rejet du déchet du secteur de production stocké par l'industrie *j* (*i= 1, ..., m; j= 1, ..., n*).

s_i^c Un élément s_{ij} de cette matrice représente le rejet du déchet du secteur de consommation des biens stocké par l'industrie *j* (*i= 1, ..., m; j= 1*).

s_{ij}^{d} Un élément s_{ij} de cette matrice représente le rejet de un déchet i stocké par l'industrie j (i= 1, ..., n ; j= 1, ..., m).

Y_i^s Un élément Y_i de cette matrice représente le rejet du déchet i résultant de la demande finale pour le produit i (i= 1, ..., m).

S_i Un élément S_i de ce vecteur, obtenu en sommant les éléments de la colonne i des secteurs de générations des déchets, représente l'output total du produit i rejeté dans l'environnement.

V_j^l Un élément V_j de cette matrice représente les dépenses industrielles un facteur productif comme le travail consommé pour l'industrie de secteur j (j= 1, ..., m).

X_j^l Un élément X_j de ce vecteur, obtenu en sommant les éléments de la colonne j des secteurs du déchet, représente un facteur productif comme le travail consommé par l'industrie j (j= 1, ..., m).

7.2.1. Tableau I/O des trois processus et trois commodités

			Demande intermédiaire				
			Secteur de production	Secteur de consommation	Déchets	Demande Finale	Sorties Totales
			1,K ,n	1	1,K ,m		
Input	Production des biens	1 M n	x_{ij}^{pp}	x_i^{pc}	x_{ij}^{pd}	Y_i^p	X_i^p
	Consommation des biens	1	x_j^{cp}	x_{ij}^{cc}	x_j^{cd}	Y^c	X^c
	Générations des déchets	1 M m	s_{ij}^p	s_i^c	s_{ij}^d	Y_i^s	S_i
	Intrants primaires		V_j^p	V^c	V_j^l		
	Intrants Totaux		X_j^p	X^c	X_j^l		

Source : L 'auteur

7.3 Tableau EIO : Deux processus et deux commodités en considérant la production des déchets et le recyclage de la matière.

Ayres *et al.* (1969) ont introduit le principe de conservation de matière ou deuxième loi de la thermodynamique *rien ne se perd, rien ne se crée, tout se transforme* dans le modèle I/O. La quantité totale des ressources naturelles qui entrent dans le système économique en tant qu'*input* est égale à la somme de ce qui est produit en tant qu'*output*, après un processus de recyclage de matière qui reste dans le système économique. En ce sens, la cascade des processus de production, consommation, stockage, recyclage peut être décrite à travers des variables suivantes.

x_{ij}^{pu} Un élément x_{ij} de cette matrice représente le rejet (matière) dans l'environnement (Fond) du produit écologique i recyclé par le secteur j (i= 1, ..., n ; j= 1, ..., k).

x_{j}^{cu} Un élément x_{ij} de cette matrice représente le rejet (matière) du secteur de production des biens du produit économique i recyclé par le secteur j (i= 1 ; j= 1, ..., k).

x_{ij}^{uu} Un élément x_{ij} de cette matrice représente le rejet (matière) du secteur de recyclage du produit économique i recyclé par le secteur j (i= 1, ..., k ; j= 1, ..., k).

x_{ij}^{up} Un élément x_{ij} de cette matrice représente le rejet (matière) du secteur de génération du déchet économique i recyclé par le secteur j (i= 1, ..., k ; j= 1, ..., n).

x_{i}^{uc} Un élément x_{ij} de cette matrice représente le rejet (matière) du secteur de génération du déchet économique i recyclé par le secteur j (i= 1, ..., k ; j= 1).

x_{ij}^{ud} Un élément x_{ij} de cette matrice représente le rejet (matière) du secteur de génération du déchet économique i recyclé par le secteur j (i= 1, ..., k ; j= 1, ..., n).

$x_{ij}^{pr_u}$ Un élément x_{ij} de cette matrice représente le rejet (matière) dans l'environnement (Fond) du produit écologique i stocké par le secteur j (i= 1, ..., n ; j= 1, ..., k).

$x_{j}^{ef_u}$ Un élément x_{ij} de cette matrice représente le rejet (matière) dans l'économie (Fond) du produit écologique i stocké par l'industrie j (i= 1 ; j= 1, ..., k).

$s_{ij}^{r_u}$ Un élément s_{ij} de cette matrice représente le rejet (matière) du secteur de génération du déchet i stocké par l'industrie j (i= 1, ..., n ; j= 1, ..., k).

$x_{ij}^{ur_u}$ Un élément x_{ij} de cette matrice représente le rejet (matière) du secteur de stockage du déchet i stocké par l'industrie j (i= 1, ..., n ; j= 1, ..., k).

x_{ij}^{ru} Un élément x_{ij} de cette matrice représente le rejet (matière) du secteur de stockage du déchet i recyclé par l'industrie j (i= 1, ..., k ; j= 1, ..., k).

$Y_i^{r_u}$ Un élément Y_i de cette matrice représente le rejet du déchet i résultant de la demande finale du secteur de stockage du déchet pour le produit i (i= 1, ..., k).

Y_i^{u} Un élément Y_i de cette matrice représente le rejet du déchet i résultant de la demande finale du secteur de génération du déchet pour le produit i (i= 1, ..., k).

$X_i^{r_u}$ Un élément X_i de ce vecteur, obtenu en sommant les éléments de la colonne i des secteurs de stockage des déchets, représente l'output total du produit i (i= 1, ..., k) rejeté dans l'environnement.

X_i^{u} Un élément X_i de ce vecteur, obtenu en sommant les éléments de la colonne i des secteurs de générations des déchets, représente l'output total du produit i (i= 1, ..., k) rejeté dans l'environnement.

V_j^{u} Un élément V_j de cette matrice représente les dépenses industrielles un facteur productif total comme le travail consommé par l'industrie de stockage j (j= 1, ..., k).

V_j^{l} Un élément V_j de cette matrice représente les dépenses industrielles en facteur productif total comme le travail pour l'industrie de secteur j (j= 1, ..., k).

$X_j^{r_u}$ Un élément X_j de ce vecteur, obtenu en sommant les éléments de la colonne j des secteurs de stockage, représente un facteur productif total comme le travail total consommé par l'industrie pour le secteur j (j= 1, ..., k).

X_j^{u} Un élément X_j de ce vecteur, obtenu en sommant les éléments de la colonne j des secteurs de génération, représente un facteur productif total comme le travail consommé par l'industrie de secteur j (j= 1, ..., k).

7.3.1 Tableau I/O des cinq processus et cinq commodités

			Demande intermédiaire						
			Product	Conso	Gene	Stock	Recycl	Demande Finale	Sorties Totales
			$1,\ldots,n$	1	$1,\ldots,m$	$1,\ldots,k$	$1,\ldots,k$		
Input	Production des biens	$1 \ldots n$	x_{ij}^{pp}	x_i^{pc}	x_{ij}^{pd}	x_{ij}^{pu}	$x_{ij}^{pr_u}$	Y_i^p	X_i^p
	Consommation des biens	1	x_j^{cp}	x_{ij}^{cc}	x_j^{cd}	x_j^{cu}	$x_j^{cr_u}$	Y^c	X^c
	Générations des déchets	$1 \ldots m$	s_{ij}^p	s_i^c	s_{ij}^d	s_{ij}^u	$s_{ij}^{r_u}$	Y_i^s	S_i
	Stockage des déchets	$1 \ldots k$	x_{ij}^{up}	x_i^{uc}	x_{ij}^{ud}	x_{ij}^{uu}	$x_{ij}^{ur_u}$	Y_i^u	X_i^u
	Recyclage de la matière	$1 \ldots k$	0	0	x_{ij}^{ru}	0	0	$Y_i^{r_u}$	$X_i^{r_u}$
	Intrants primaires		V_j^p	V^c	V_j^l	V_j^l	V_j^u		
	Intrants Totaux		X_j^p	X^c	X_j^l	X_j^u	$X_j^{r_u}$		

Source : L'auteur

7.4 Tableau EIO : Deux processus et deux commodités en considérant la production des déchets et le recyclage de matière et de l'énergie.

Dans une extension de papier d'Ayres et Kneese (1969) ont introduit la deuxième loi de la thermodynamique dans le modèle I/O. Cela signifie que l'énergie doit être conservée dans le modèle, comme dans une fermeture entropique. En ce sens, la cascade des processus de production, consommation, stockage, recyclage et valorisation énergétique des déchets peut être décrite à travers des variables suivantes.

$x_{ij}^{pr_l}$ Un élément x_{ij} de cette matrice représente le rejet dans l'environnement (Fond) du produit écologique *i* réutilisable par le secteur *j* (*i= 1, ..., n ; j =* $k+1,\mathrm{K}\ ,m$).

x_j^{cr} Un élément x_{ij} de cette matrice représente le rejet dans l'économie (Fond) du produit écologique *i* valorisable comme énergie par l'industrie *j* (*i= 1 ; j =* $k+1,\mathrm{K}\ ,m$).

$s_{ij}^{r_l}$ Un élément s_{ij} de cette matrice représente le rejet (énergie) du secteur de génération du déchet *i* valorisé par l'industrie *j* (*i= 1, ..., n ; j=* $k+1,\mathrm{K}\ ,m$).

$x_{ij}^{ur_l}$ Un élément x_{ij} de cette matrice représente le rejet (matière) du secteur de génération du déchet *i* recyclé par l'industrie *j* (*i= 1, ..., n ; j=* $k+1,\mathrm{K}\ ,m$).

$x_{ij}^{lr_l}$ Un élément x_{ij} de cette matrice représente le rejet (énergie) du secteur de stockage du déchet *i* valorisé par l'industrie *j* (*i= 1, ..., l ; j =* $k+1,\mathrm{K}\ ,m$).

x_{ij}^{pl} Un élément x_{ij} de cette matrice représente le rejet (énergie) dans l'environnement (Fond) du produit écologique *i* valorisé par le secteur *j* (*i= 1, ..., m ; j= 1, ..., l*).

x_j^{cl} Un élément x_{ij} de cette matrice représente le rejet (énergie) du secteur de production des biens du produit économique *i* valorisé par le secteur *j* (*i= 1 ; j= 1, ..., l*).

s_{ij}^{l} Un élément x_{ij} de cette matrice représente le rejet (énergie) du secteur de génération du produit économique *i* recyclé par le secteur *j* (*i= 1, ..., m ; j= 1, ..., l*).

x_{ij}^{ul} Un élément x_{ij} de cette matrice représente le rejet (énergie) du secteur de génération du produit économique *i* recyclé par le secteur *j* (*i= 1, ..., k ; j= 1, ..., l*).

x_{ij}^{ll} Un élément Y_i de cette matrice représente le rejet du déchet i résultant de la demande finale pour le produit *i* (*i =* $k+1,\mathrm{K}\ ,m$).

x_{ij}^{rl} Un élément x_{ij} de cette matrice représente le rejet (matière) du secteur de stockage du déchet *i* valorisable par l'industrie *j* (*i=* $k+1,\mathrm{K}\ ,m$ *; j= 1, ...l*).

x_{ij}^{lp} Un élément x_{ij} de cette matrice représente le rejet (matière) du secteur de production de un déchet économique *i* valorisé par le secteur *j* (*i= 1, ..., l ; j= 1, ..., n*).

x_i^{lc} Un élément x_{ij} de cette matrice représente le rejet (matière) du secteur de génération du déchet économique *i* valorisé par le secteur *j* (*i= 1, ..., l ; j= 1*).

x_{ij}^{ld} Un élément x_{ij} de cette matrice représente le rejet (matière) du secteur de génération du déchet économique *i* généré par le secteur *j* (*i= 1, ..., l ; j= 1, ..., m*).

$x_{ij}^{lr_u}$ Un élément x_{ij} de cette matrice représente le rejet (matière) du secteur de génération du déchet économique *i* stocké par le secteur *j* (*i= 1, ..., l ; j= 1, ..., k*).

$x_{ij}^{lr_l}$ Un élément x_{ij} de cette matrice représente le rejet (matière) du secteur de génération du déchet économique *i* recyclé par le secteur *j* (*i= l, ..., k ;* $j= k+1,\mathrm{K}\ ,m$).

x_{ij}^{lu} Un élément x_{ij} de cette matrice représente le rejet (matière) du secteur de génération du déchet économique *i* recyclé par le secteur *j* (*i= 1, ..., l ; j= 1, ..., k*).

x_{ij}^{ll} Un élément x_{ij} de cette matrice représente le rejet (matière) du secteur de génération du déchet économique *i* recyclé par le secteur *j* (*i= 1, ..., l ; j= 1, ..., l*).

$Y_i^{r_l}$ Un élément Y_i de cette matrice représente le rejet du déchet i résultant de la demande finale du secteur de stockage du déchet pour le produit *i* ($i= k+1,\mathrm{K}\ ,m$).

Y_i^{l} Un élément Y_i de cette matrice représente le rejet du déchet i résultant de la demande finale du secteur de génération du déchet pour le produit *i* (*i= 1, ..., l*).

$X_i^{r_l}$ Un élément X_i de ce vecteur, obtenu en sommant les éléments de la colonne i des secteurs de stockage des déchets, représente l'output total du produit *i* (*i=* $k+1,\mathrm{K}\ ,m$) rejeté dans l'environnement.

X_i^{l} Un élément S_i de ce vecteur, obtenu en sommant les éléments de la colonne i des secteurs de générations des déchets, représente l'output total du produit *i* (*i= 1, ..., l*) rejeté dans l'environnement.

V_j^{u} Un élément V_j de cette matrice représente les dépenses industrielles dans un facteur productif comme le travail *j* (*j= 1, ..., k*).

V_j^{l} Un élément V_j de cette matrice représente les dépenses industrielles dans un facteur productif comme le travail consommé pour l'industrie de secteur *j* (*j= 1, ..., k*).

$X_j^{r_u}$ Un élément X_j de ce vecteur, obtenu en sommant les éléments de la colonne *j* des secteurs de stockage, représente un facteur productif comme le travail consommé par l'industrie *j* (*j= 1, ..., k*).

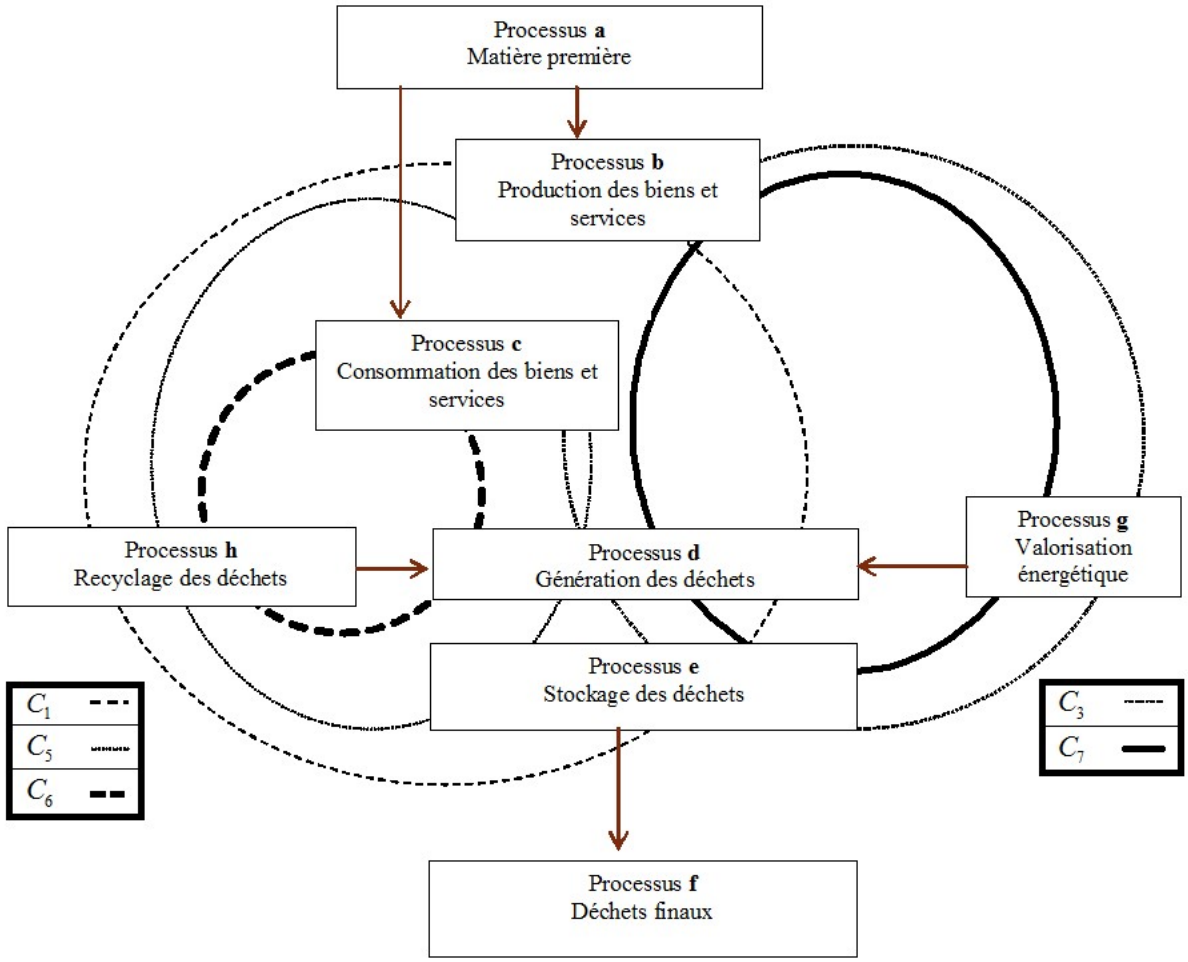
X_j^{u} Un élément X_j de ce vecteur, obtenu en sommant les éléments de la colonne *j* des secteurs de génération, représente un facteur productif comme le travail consommé par l'industrie *j* (*j= 1, ..., k*).

7.4.1 Tableau I-O des sept processus et sept commodités

			Demande intermédiaire							DF	ST
			Prod	Co	Gene	Sto Mat	Sto éne	Rec	Val		
			$1,\mathrm{K},n$	1	$1,\mathrm{K},m$	$1,\mathrm{K},k$	$1,\mathrm{K},l$	$1,\mathrm{K},k$	$k+1,\mathrm{K},m$		
Input	Production bien	$1,\mathrm{K},n$	x_{ij}^{pp}	x_i^{pc}	x_{ij}^{pd}	x_{ij}^{pu}	x_{ij}^{pl}	$x_{ij}^{pr_u}$	$x_{ij}^{pr_l}$	Y_i^p	X_i^p
	Consommation bien	1	x_j^{cp}	0	x_j^{cd}	x_j^{cu}	x_j^{cl}	$x_j^{cr_u}$	$x_j^{cr_l}$	Y^c	X^c
	Génération déchet	$1,\mathrm{K},m$	s_{ij}^p	s_i^c	s_{ij}^d	s_{ij}^u	s_{ij}^l	$s_{ij}^{r_u}$	$s_{ij}^{r_l}$	Y_i^s	S_i
	Stockage déchet (mat)	$1,\mathrm{K},k$	x_{ij}^{up}	x_i^{uc}	x_{ij}^{ud}	x_{ij}^{uu}	x_{ij}^{ul}	$x_{ij}^{ur_u}$	$x_{ij}^{ur_l}$	Y_i^u	X_i^u
	Stockage déchet (énergie)	$1,\mathrm{K},l$	x_{ij}^{lp}	x_i^{lc}	x_{ij}^{ld}	x_{ij}^{lu}	x_{ij}^{ll}	$x_{ij}^{lr_u}$	$x_{ij}^{lr_l}$	Y^l	X_i^l
	Recyclage de la matière	$1,\mathrm{K},k$	0	0	x_{ij}^{ru}	0	0	0	0	$Y_i^{r_u}$	X_i^r
	Valorisation énergétique	$k+1,\mathrm{K},m$	0	0	0	x_{ij}^{rl}	0	0	0	$Y_i^{r_l}$	$X_i^{r_l}$
	Intrants primaires		V_i^p	V^c	V_j^l	V_j^l	V_j^l	V_j^u	V_j^r		
	Intrants Totaux		X_j^p	X^c	X_j^l	X_j^u	X_j^l	$X_j^{r_u}$	$X_j^{r_l}$		

Source : L'auteur

Figure 7.4.2 Schéma des flux circulaires selon modèle I/O



Source : L'auteur

Ces circuits sont représentés à travers des transferts T_{ij} ($i= a,b,c,d,e,f,g,h$; $j= a,b,c,d,e,f,g,h$) entre deux processus (ci-dessous à gauche). Ces circuits peuvent être présents en utilisant les variables du modèle input-output (ci-dessous à droite).

$$C_1 = T_{bd} + T_{df} + T_{fh} + T_{hb}$$
$$C_2 = T_{bd} + T_{df} + T_{fh} + T_{hc}$$
$$C_3 = T_{bd} + T_{df} + T_{fh} + T_{gb}$$
$$C_4 = T_{bd} + T_{df} + T_{fh} + T_{gc}$$
$$C_5 = T_{cd} + T_{df} + T_{fh} + T_{hb}$$
$$C_6 = T_{cd} + T_{df} + T_{fh} + T_{hc}$$
$$C_7 = T_{cd} + T_{df} + T_{fg} + T_{gb}$$
$$C_8 = T_{cd} + T_{df} + T_{fg} + T_{gc}$$

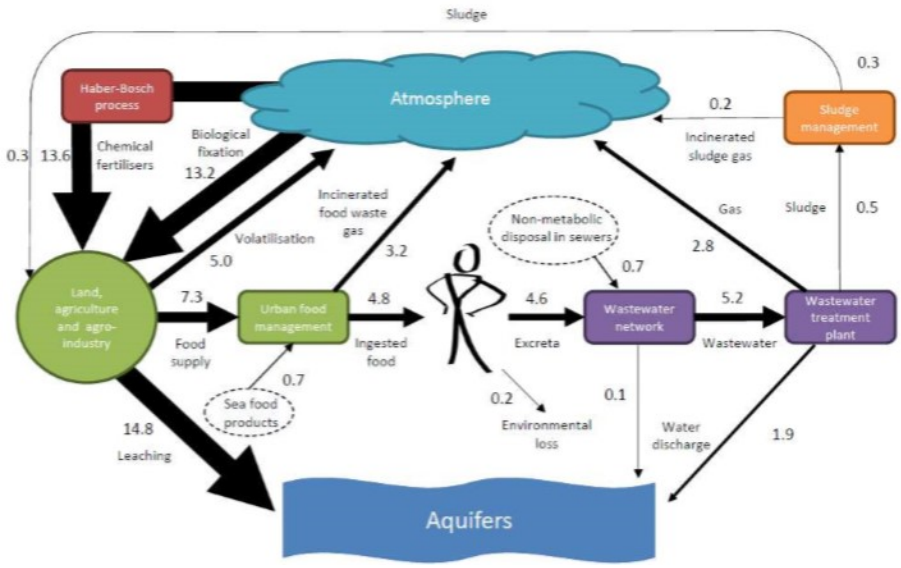
$$C_1 = x_{ij}^{pd} + s_{ij}^{ru} + x_{ij}^{ru} + x_{ij}^{up}$$
$$C_2 = x_{ij}^{pd} + s_{ij}^{ru} + x_{ij}^{ru} + x_{ij}^{uc}$$
$$C_3 = x_{ij}^{pd} + s_{ij}^{ri} + x_{ij}^{rl} + x_{ij}^{lp}$$
$$C_4 = x_{ij}^{pd} + s_{ij}^{ri} + x_{ij}^{rl} + x_{ij}^{lc}$$
$$C_4 = x_{ij}^{pd} + s_{ij}^{ri} + x_{ij}^{rl} + x_{ij}^{lc}$$

7.5 Le bouclage dans le cycle de l'azote : une intégration par modélisation I/O

Dans le contexte de bouclage de flux de matière, nous nous inspirerons et suivrons la démarche établie par Ayres *et al.* (1969). Ce cadre considère un ensemble de commodités et de secteurs économiques interdépendants. Il établit également des hypothèses qui ont été explorées dans le chapitre quatre de la thèse. Après cette présentation, cette partie se focalisera sur une structure en utilisant des numéraires physiques.

Le tableau entrées-sorties physique complet et symétrique peut être exprimé de deux façons. Premièrement, il peut donner les flux matériels intersectoriels (tableau industries par industries ou industry by industry). Deuxièmement, il peut être exprimé selon les matières et donner ainsi les liens quantitatifs entre les matières (tableau matières x matières) (Pedersen *et al.* 2006). La question que l'on peut se poser à ce stade est de savoir : quel type de données utiliser ? Nous avons adapté les données proposées par Esculier *et al.* (2015) comme suit :

Figure 7.5 : Cycle de l'azote Idf en Kg/pers/ans



Source: Esculier *et al.* 2015

Nous nous proposons maintenant d'étudier les différentes structures qui considèrent le travail comme une marchandise en utilisant ce cycle :

A. **Scénario sans bouclage de flux**

Le scénario de référence sans mécanismes de bouclage peut être aussi exploré en utilisant les processus dans le tableau 7.5.1 :

Tableau 7.5.1 : 4 commodités et 4 secteurs économiques

			Demande intermédiaire					
			Produc azote	Agriculture	Alim	Trait Déchet	DF	Output Total
			$1,\mathrm{K},n$	1	$1,\mathrm{K},m$	$1,\mathrm{K},k$		
Input	Azote	$1\ \mathrm{M}\ n$	10	0	1.34	0	Y_i^p	13.6
	Végétaux	1	13.6	0	1.34	0	Y^c	10.4
	Travail	$1\ \mathrm{M}\ m$	0	4.8	1.34	0	Y_i^s	9.96
	Déchet	$1\ \mathrm{M}\ k$	0	0	1.34	5.2	$Y_i^{r_u}$	0.5
	Intrants primaires	V_i^p	V^c	V_j^l	V_j^l	V_j^r		
	Intrants totaux	X_j^p	X^c	X_j^l	X_j^u	$X_j^{r_i}$		

Source : L'auteur

À l'intérieur du tableau 7.5.1, le capitalisme considère le travail humain comme une bien ou ressource à l'intérieur du système marchand ou du système de valeur en échange dans la zone d'exploitation (cf. sections 6.1 et 6.2), une typologie des systèmes d'exploitation centre-périphérie peut être exploré en annexe VII.A.

B. Scénario de bouclage de flux de matière

Ce scénario utilise le principe de conservation de matière ou deuxième loi de la thermodynamique *rien ne se perd, rien ne se crée, tout se transforme* dans le modèle I/O. Cela signifie que la masse est conservée dans le modèle. Le flux peut être présente dans une matrice I/O *commodities by industry* .

Tableau 7.5.2 : 4 commodités et 4 secteurs économiques

			Demande intermédiaire					
			Produc azote	Agriculture	Alim	Trait Déchet	DF	Output total
			$1,\mathrm{K},n$	1	$1,\mathrm{K},m$	$1,\mathrm{K},k$		
Input	Azote	$1,\mathrm{K},n$	10	0	1.34	0	Y_i^p	13.6
	Végétaux	1	13.6	0	1.34	0.3	Y^c	10.4
	Travail	$1,\mathrm{K},m$	0	4.8	1.34	0	Y_i^s	9.96
	Déchet	$1,\mathrm{K},k$	0	0	1.34	5.2	$Y_i^{r_u}$	0.5
	Intrants primaires	V_i^p	V^c	V_j^l	V_j^l	V_j^r		
	Intrants totaux	X_j^p	X^c	X_j^l	X_j^u	$X_j^{r_i}$		

Source : L'auteur

C. Scénario de bouclage de flux de matière case spéciale 1.

Tableau 7.5.3 : 4 commodités, 2 biens naturels, 4 secteurs économiques et 2 secteurs écologiques

			Demande intermédiaire						
			HUMAN				NON HUMAN		
			PRODUCITION AZOTE	AGRICULTURE	ALIMENTATION	TRAITEMENT DECHET	HYDROSPHERE	ATMOSPHERE	OUTPUT TOTALE
Input	H	AZOTE	10	0	1.34	0	0	0	13.6
		VÉGÉTAUX	13.6	0	1.34	0.3	0	0	10.4
		TRAVAIL	0	4.8	1.34	0	0	0	9.96
		DÉCHET (NO_X OU NITRATE)	0	0	1.34	5.2	0	0	0.5
	NH	PROLIFÉRATION D'ALGUES	0	0	0	14.8	0	0	25
		PLUIES ACIDES	0	0	0	5.1	0	5.6	43

Source : L'auteur

Le résultat de l'échange entre le centre (HUMAN=H) et la périphérie (NON HUMAN=NH) était un flux de plus-value (Wallerstein, 1947). De plus, la périphérie est la biosphère qui apporte des intrants comme l'azote et les végétaux à l'économie et sort en termes du déchets, de la prolifération d'algues ou des pluies acides. Ce système correspond à la manière dont on utilise et entretien dans les processus autonomes des ressources comme la force de travail et le azote, comme cela a déjà été indiqué précédemment dans le tableau 6.3.2, c'est la conséquence du découplage entre la reproduction des ressources et la circulation du capital (cf. section 6.3.2).

D. Scénario de bouclage de flux de matière case spéciale 2.

Cet scénario présente de façon synthétique comme le capitalisme été capable d'internaliser à travers d'un processus de cooptation, la planète vivante et leurs processus biogéochimiques (cf. tableau 6.3.2), dans ce système le capitalisme a largement augmenté sa capacité pour transformer l'environnement dont c'est le modèle post révolution industrielle anglaise (cf. section 6.3.5).

Tableau 7.5.4 : 6 commodités et 6 secteurs économiques

			Demande intermédiaire						
			HUMAN						
			PRODUCITION ÀZOTE	AGRICULTURE	ALIMENTATION	TRAITEMENT DECHET	TRAITMENT EAU	INCINERATION DECHET	OUTPUT TOTALE
Input	HUMAN	AZOTE	10	0	1.34	0	0	0	13.6
		VÉGÉTAUX	13.6	0	1.34	0.3	0	0	10.4
		TRAVAIL	0	4.8	1.34	0	0	0	9.96
		DÉCHET (NO_X OU NITRATE)	0	0	1.34	5.2	0	0	0.5
		REDUCTION DE CYANOBACTER	0	0	0	14.8	0	0	25
		RÉDUCTION PH	0	0	0	5.1	0	5.6	43

Source L'auteur

E. Scénario de bouclage des flux des *fours cheaps* (matière et énergie).

Dans cet scénario le capitalisme été capable d'internaliser à travers d'un processus de cooptation, les quatre *inputs* fondamentaux comme la main-d'œuvre, l'alimentation, l'énergie et les matières premières. Moore appellent ces quatre composants comme *fours cheaps* (cf. section 6.3.2). L'utilisation synchronisée des *fours cheaps* parvient à entretenir une dynamique productive vertueuse. De plus, la diminution de la synchronie d'utilisation des *fours cheaps* commence à se dégrader vers une dynamique d'accumulation et finalement vers une phase de financiarisation (Arrigli, 1994; Moore, 2015).

Tableau 7.5.5 : 5 commodités et 5 secteurs économiques

			Demande intermédiaire					
			HUMAN					
			PRODUCTION AZOTE	AGRICULTURE	ALIMENTATION	TRAITEMENT DECHET	VALORISAT ENERGIE	OUTPUT TOTALE
Input	HUMAN	AZOTE	10	0	1.34	0	5	13.6
		VÉGÉTAUX	13.6	0	1.34	0.3	5	10.4
		TRAVAIL	0	4.8	1.34	0	5	9.96
		DÉCHET (NO_X OU NITRATE)	0	0	1.34	5.2	5	0.5
		ÉNERGIE	0	0	0	14.8	5	25

Source : L'auteur

F. Scénario de bouclage des flux de matière et d'énergie : case spéciale

Cet scénario présente l'échange des marchandises ou *fours cheaps* entre l'économie (HUMAN) et la biosphère (NON HUMAN). La structure permettra aussi de définir les types de processus selon leur colonne :

1. Les processus de grand cycle ou de *l'économie écologique* (NON HUMAN) utilisent comme *fond* l'hydrophere et l'atmosphere : il s'agit de ressources non gérées par l'économie ou *sauvages* ;
2. Les processus du système économique (HUMAN) qui sont représentés par les processus de *cycle moyen* (cf. section 2.1) comme la production d'azote, l'agriculture et la alimentation : il s'agit des processus utilisés et gérés par le homme ;
3. Les processus de *réversion* (cf. section 2.1) du système économique qui sont représentés par les processus de *cycle moyen* comme le traitement de déchet et la valorisation énergetique.

Tableau 7.5.6 : 5 commodités, 2 biens naturelles, 5 secteurs économiques et 2 secteurs écologiques

			Demande intermédiaire							
			HUMAN					NON HUMAN		
			PRODUCTION AZOTE	AGRICULTURE	ALIMENTATION	TRAITEMENT DECHET	VALORISATEN ENERGIE	HYDROSPHERE	ATMOSPHERE	OUTPUT TOTAL
Input	HUMAN	AZOTE	10	0	1.34	0	5	0	0	13.6
		VÉGÉTAUX	13.6	0	1.34	0.3	5	0	0	10.4
		TRAVAIL	0	4.8	1.34	0	5	0	0	9.96
		DÉCHET	0	0	1.34	5.2	5	0	0	0.5
		ÉNERGIE	0	0	1.34	0.5	5	0	0	25
	NONHUMAN	PROLIFÉRATION D'ALGUES	0	0	0	0	0	10	0	25
	NONHUMAN	PLUIES ACIDES	0	0	0	5.1	0	0	5.6	4.3

Source : L'auteur

7.6 Conclusion du Chapitre 7

Dans notre étude, l'usage des modèles I/O permet de donner un cadre formel dans l'analyse et les réflexions sur le flux de matière et d'énergie de la biosphère. Dans ce sens, le chapitre VII présente une typologie de quatre structures I/O du système pour formaliser les relations économiques physiques en utilisant l'approche proposée pour Isard (1968) et plus tard Victor (1972) et McDonald (2005).

Cette formalisation propose une typologie de quatre structures input-output du système pour explorer les relations économiques physiques.

- Le tableau EIO qui présente deux processus et deux commodités, cette structure peut être définie comme une cascade dont flux linéaire de production des biens, consommation des biens.

- Le Tableau EIO qui développe deux processus et deux commodités en considérant les déchets, ce flux linéaire peut être présenté au travers d'une cascade de production des biens, consommation des biens et production du déchets.

- Le tableau EIO qui débouche sur deux processus et deux commodités en considérant la production des déchets et le recyclage de la matière. Dans ce sens, il introduit le principe de conservation de matière ou deuxième loi de la thermodynamique *rien ne se perd, rien ne se crée, tout se transforme* dans le modèle I/O.

- Le Tableau EIO représente deux processus et deux commodités en considérant la production des déchets et le recyclage de matière et de l'énergie. Cela signifie que l'énergie doit être conservée dans le modèle, comme dans une fermeture entropique. Dans ce sens, la cascade des processus de production, consommation, stockage, recyclage et valorisation énergétique des déchets peut être décrite au travers des variables suivantes.

Nous avons proposé cinq cas de bouclage pour illustrer les relations *humain humain* et *humain non humain*. Malheureusement, nous ne pouvons pas poursuivre avec notre modèle sur la forme I/O car:

1) On se retrouve confronté aux problèmes d'ajustement du modèle théorique à la réalité avec des données empiriques ;

2) Les différents degrés d'agrégation adopté par le tableau permettent difficilement de montrer en détail les relations entre l'économie et l'environnement ;

3) Les difficultés à trouver des données physiques (en valeur) ou d'adapter les données monétaires en donnés en physiques au travers du déflater les donnés en utilisant un indice de prix.

8. LES APPROCHES DE LA PRODUCTION JOINTE APPLIQUEES A UNE TYPOLOGIE DES CYCLES.

LA PRODUCTION JOINTE déjà exploré au chapitre V peut être utilisée pour structurer un parcours circulaire en utilisant un numéraire comme la matière et l'énergie. La question qui se pose ensuite est de savoir: comment mesurer les boucles ? Et qu'est-ce que mesurer ?

D'abord, nous voulons définir la biosphère à travers la temporalité des processus. Dans ce sens, la question qui compte est le nombre de périodes nécessaires pour que les processus joints rentrent dans une logique circulaire. Suivant cette ligne, nous pouvons discuter la question suivante : est-ce qu'un processus peut avec d'autres processus contribuer à une opération circulaire ? Si la réponse est oui, la deuxième question est : quelle temporalité caractérise cette circularité, c'est-à-dire combien de périodes sont nécessaires pour que marche le cycle. Dans une modélisation multi période nous pouvons le définir à travers l'égalité suivante :

Nombre de périodes engagées dans un cycle = Nombre de périodes pour que le cycle soit accompli

La dernière proposition permet de définir la temporalité ou la durée du cycle à l'intérieur de cette modélisation de production jointe. En continuant, nous pouvons proposer quelques modifications sur les paramètres du processus, la question qui se pose alors est : quelles sont les hypothèses qui caractérisent le système ?

Pour caractériser le système, le niveau relatif nécessaire pour chaque processus du système circulaire peut être modifié en obtenant le même *output* qui est nécessaire pour accomplir le cycle complet avec la moitié des *inputs*. Dans ce sens, la première question qui se pose porte sur la conséquence pour les niveaux relatifs d'activité et pour la viabilité de l'ensemble.

La circularité peut être associée à une capacité de croissance de l'ensemble du processus circulaire. Dans ce sens, Quesnay[87] pose comme point de départ de son argumentation l'économie agricole comme un système qui est capable de s'entretenir en raison de son surplus, tout le reste de l'économie classique s'est développée pour savoir quel est l'usage de ce surplus. Cet usage du surplus amène au sujet de l'utilisation de ce surplus dans l'économie solidaire intertemporelle et sociale. En utilisant le surplus pour entretenir la viabilité permanente du système, le système peut rentrer dans une logique de croissance en spirale c'est-à-dire une augmentation du volume d'activité, mais sans avoir une croissance en termes de profit monétaire. De cette façon, une partie du surplus est fournie pour la croissance en spirale du système écologique, laquelle permet d'entretenir et d'agrandir la capacité jointe du système. Pour anticiper partialement la répondre à la question de la section de production jointe de la thèse, le processus peut contribuer à une opération circulaire, mais la question finalement qui est posée est la suivante : qui va accaparer cette capacité pour d'avoir une circularité dans l'ensemble de processus ?

Pour répondre à cette question de structure, cette partie propose un classement des structures qui représentent les parcours cycliques et en cascades de biens dans la biosphère. La structure distingue trois types de systèmes thermodynamiques :

[87] Pour développement détaillé sur François Quesnay, consulter l'Encyclopédie de Diderot et d'Alembert publié entre les années 1756 et 1757.

- Le système isolé, lequel n'a pas échangé de matière ou d'énergie avec l'environnement en dehors du système.
- Le système fermé, lequel n'a pas échangé de matière, par contre il échange l'énergie avec l'environnement hors du système.
- Le système ouvert, lequel échange la matière et l'énergie avec l'environnement hors du système.

Ces structures ouvertes ou fermées au niveau des frontières apparaissent à différents étages d'équilibre thermodynamique entropique ou néguentropique.

Pour caractériser cet équilibre, nous pouvons utiliser :

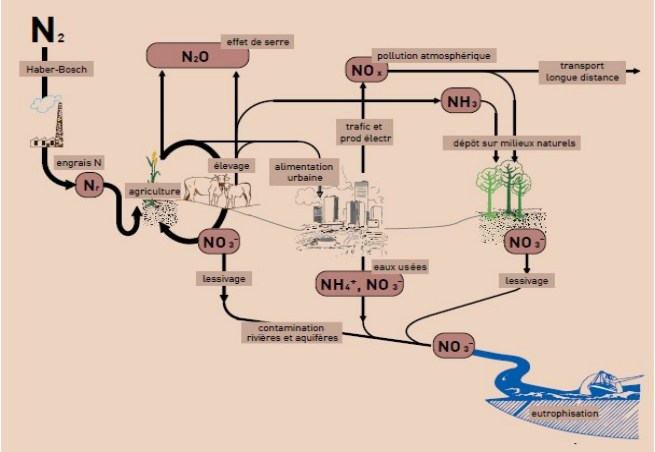
- *La première loi* de la conservation de l'énergie ou première loi de la thermodynamique. Selon cette loi, les systemes transmettent et dissipent l'énergie du système qui les produit dans un état proche de l'équilibre thermodynamique en raison de l'échange d'énergie (solaire et calorifique) et de matière entre l'atmosphère, l'hydrosphère, la lithosphère et la biosphère à une température, pression et limite spatiale donnée à un moment dans le temps (O'Connor, 1991).

- *La deuxième loi* de la thermodynamique ou principe de Carnot établie l'irréversibilité des phénomènes physiques. La réversibilité ou irréversibilité de ces transformations entropiques, nées des travaux de Carnot (Carnot, 1824, 1990) et de Clausius (Clausius, 1991), se divisent en deux branches : le travail sur la thermodynamique des processus irréversibles donc des systèmes en mouvement (donc, déséquilibrés) impulsé par Prigogine (Prigogine, 1996 ; Lagrée, 2013) et la thermodynamique statistique instiguée par Boltzmann (Boltzmann, 1987), en extension de la théorie de l'information de Brillouin (Brillouin, 1959). Plus récemment, Loiret dans l'année 2013 mesure l'entropie au travers de la distance de l'équilibre thermodynamique où indice Ka, lequel en utilisant une variable territoriale (m^2), nous donne un indice de diversité *structurale* (en Km^3) synthétisant toutes les variations spatiales d'un territoire (Loiret, 2013a).

L'irréversibilité caractérise certaines structures aux réactions en cascades, lesquelles ne peuvent se dérouler que dans le sens direct, par exemple la décomposition des aliments ou la cascade de l'azote. La notion de *réversible* permet une réaction, qui peut se produire dans le sens direct autant que dans le sens inverse comme dans un cycle.

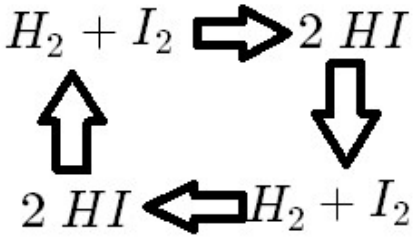
Figure 8 : Représentation de cascade et de cycle

Cascade



Source : Billen *et al.* 2011

Cycle



Source : L'auteur

Dans un contexte de réversibilité, les choix ne sont pas décisifs pour l'a venir ; il est toujours possible de revenir en arrière.

Or en matière d'entropie Herman Daly a fait prendre conscience de l'irréversibilité de processus de dégradation du capital naturel. Daly en 1973 a caractérisér le type de développement de la biosphère au travers de la théorie de l'État stationnaire où les activités sont relativement stables, ne favorisant ainsi ni la croissance ni la décroissance en thermes biophysiques (O'Connor, 1996).

Du fait de, l'existence de certaines réactions en cascades ou de certaines réactions complètement cycliques, différentes méthodes de traitement des grands cycles biochimiques apparaissent.

Cette nouvelle considération plaide en faveur d'un accroissement de la compréhension des processus circulaires ou semi-circulaires au sein des cycles de la biosphère. Kenneth Boulding en 1966 a pris en compte cette question à travers son modèle d'économie du vaisseau spatial pour caractériser la biosphère comme un système fermé. Ce système fermé est souvent confronté à des phénomènes irréversibles comme la destruction et la disparition des écosystèmes et des espèces naturelles.

Dans ce contexte de réversibilité ou d'irréversibilité, la structure peut être formalisée au travers de leurs intrants et sorties. Étant donné une matrice des intrants A et des sorties B de dimension $m\ x\ n$, il peut être utile de la décomposer en sous-matrices pour mettre en évidence les caractéristiques de leurs blocs.

Par exemple, la matrice :

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \Lambda & a_{nn} \\ a_{21} & a_{22} & \Lambda & a_{2n} \\ \mathrm{M} & \mathrm{M} & & \mathrm{M} \\ a_{m1} & a_{m2} & \Lambda & a_{mn} \end{bmatrix} \quad B = \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} & \Lambda & b_{nn} \\ b_{21} & b_{22} & \Lambda & b_{2n} \\ \mathrm{M} & \mathrm{M} & & \mathrm{M} \\ b_{m1} & b_{m2} & \Lambda & b_{mn} \end{bmatrix} \qquad (8.0.1)$$

Les matrices A et B peuvent être décomposées en 9 sous-matrices, ce qui revient à l'écrire sous la forme :

$$A=\begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{13} \\ A_{21} & A_{22} & A_{23} \\ A_{31} & A_{32} & A_{33} \end{bmatrix} \quad B=\begin{bmatrix} B_{11} & B_{12} & B_{13} \\ B_{21} & B_{22} & B_{23} \\ B_{31} & B_{32} & B_{33} \end{bmatrix} \tag{8.0.2}$$

Les matrices A *et* B peuvent être récrites sous la forme 8.0.3,

$$A=\left[\begin{array}{c|c|c} A_{11} & A_{12} & A_{13} \\ \hline A_{21} & A_{22} & A_{23} \\ \hline A_{31} & A_{32} & A_{33} \end{array}\right] B=\left[\begin{array}{c|c|c} B_{11} & B_{12} & B_{13} \\ \hline B_{21} & B_{22} & B_{23} \\ \hline B_{31} & B_{32} & B_{33} \end{array}\right] \tag{8.0.3}$$

Cette structure permettre de définir trois catégories de principaux des blocs dans les lignes:

1. Les blocs dehors du système économique ou *sauvages* qui sont représentés par les sous-matrices des intrants A_{11}, A_{12}, A_{13} et des sorties B_{11}, B_{12}, B_{13} : il s'agit des processus que ne sont pas inclus dans le système économique comme la production de l'énergie au soleil ou la reproduction d'une force de travail comme un *fond* externe au système.

2. Les blocs du système économique sont représentés par les sous-matrices des intrants A_{21}, A_{22}, A_{23} et des sorties B_{21}, B_{22}, B_{23} : il s'agit des processus utilisés et gérés par l'économie comme la production industrielle d'énergie, l'agriculture et le métabolisme urbain.

3. Les blocs de transformation des déchets sont représentes par les intrants A_{31}, A_{32}, A_{33} et des sorties B_{31}, B_{32}, B_{33} : il s'agit de processus complètement piloté par l'homme comme la valorisation énergétique du déchets.

La structure 8.0.3 permettra aussi de définir les types de blocs selon leur colonne :

α : Les blocs de *l'économie écologique* sont représentés par les sous-matrices des intrants A_{11}, A_{21}, A_{31} et des sorties B_{11}, B_{21}, B_{31} : il s'agit de ressources non gérées par l'économie ou *sauvages*.

β : Les blocs de l'économie sont représentés par les sous-matrices des intrants A_{12}, A_{22}, A_{32} et des sorties B_{12}, B_{22}, B_{32} : il s'agit de ressources partiellement gérées par l'économie l'énergie raffinée, les aliments, le capital urbain (argent).

δ :Les blocs des déchets sont représentés par les sous-matrices des intrants A_{13}, A_{23}, A_{33} et des sorties B_{13}, B_{23}, B_{33} : il s'agit des déchets qui peuvent être valorisés ou recyclés.

Les processus du bloc de δ permettrait d'opérer trois cas de figure pour la réversion :

A. **Inédit** :La réversion ou renouvellement de la ressource dépend d'un processus naturel que nous appellerons comme *inédit* ou l'*output* du processus est génère comme un sub produit de l'activité économique. De plus, il constitue un input d'un processus naturel qui va à jouer un rôle positif dans le renouvellement d'une ressource naturel. Donc, il ne été pas conçu ou début comme la justification du processus, mais il contribue a la nature.

B. **Économie** : La réversion permettre de renouvelé un ressource naturel à travers d'un processus économique qu'utilisé des ressources naturelles.

C. **Nature** : La nature opère un service de recyclage ou restitution des ressources naturelles en forme autonome.

Après cette typologie de processus et de types de réversion, les relations entre les processus peuvent être définies au travers d'un modèle processus-transfert-fonds :

Ce modèle contient une liste des éléments impliqués dans le système, lesquels sont classés en fonds et transfert, tandis que le temps apparaît comme une dimension explicite du processus.

Ensuite, le modèle porte sur le processus de production comme un ensemble d'opérations coordonnées et exécutées par des éléments complémentaires et dont les actions sont disposées en plusieurs phases, selon une séquence temporelle.

Finalement, les fonds sont caractérisés par leur capacité à fournir des services pendant un certain intervalle de temps. Par conséquent, les fonds entrant et sortant du processus sont comme des éléments immuables. Dans les fonds nous pouvons trouver des travailleurs de la terre (comprise comme une surface), des installations et des équipements de production et des stocks.

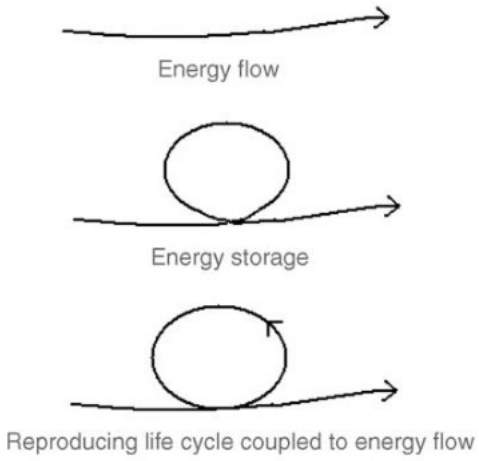
8.1 Les cycles et les cascades formalisées au travers de la production jointe.

Deux visions ont été proposées pour cadrer la relation entre économie et entropie. Dans la première vision M. Solow reconnait l'existence de l'entropie, mais, il dit que le sujet n'est pas du tout important pour la modélisation économique (Mayumi *et al.* 1998).

Cette première position a été critiquée pour l'économie écologique qui étude la relation entre la thermodynamique et l'économie (Geourgescu Roegen, 1971; O'Connor, 1986; Daly, 1997 ; Baumgartner, 1999, 2005), il s'agit de chercher la relation entre la conservation de l'énergie et les lois de la thermodynamique.

La clé pour comprendre cette relation entre la matière, l'énergie et la thermodynamique n'est pas du tout l'étude de flux (Prigogine, 1967; Morowitz, 1968; Ulanowicz, 1983), mais l'étude des relations de processus de stockage de matière et d'énergie dans un système ouvert ou fermé. Cette étude peut être réalisée en utilisant une typologie des flux.

Figure 8.1.1 : Typologies des flux de matière et d'énergie



Source : Ho, 2005

Cette thèse propose une typologie plus large de dix structures du système pour formaliser les relations économie-physique. Les structures numérotées de 1 à 9 ne concernent que la matière, la structure numéro 10 concerne la matière et l'énergie.

Tableau 8.1 : Comparaison de structure des cycles et des cascades

N°	*Type de flux*	*cycle*	*surplus*	*entropie*	*mesure polluante*	*mesure intrants primaires*	*production jointe*	*Type de réversion (δ)*
1	Flux circulaire 1	fermé	no	no	no	no	oui	Nature
2	Flux circulaire 2	assez fermé	oui	oui	no	no	oui	Nature
3	Flux circulaire 3	assez fermé	oui	oui	no	no	oui	Nature
4	Flux circulaire 4	assez fermé	oui	oui	oui	oui	oui	Économie
5	Cascade 1	ouverte	oui	no	no	oui	oui	no
6	Cascade 2	ouverte	oui	no	oui	oui	oui	no
7	Cascade 3	ouverte	oui	no	oui	oui	oui	no
8	Cascade 4	ouverte	oui	néguentropie	oui	oui	oui	Économie
9	Cascade 5	ouverte	oui	néguentropie	no	oui	oui	Économie
10	Cascade 6	ouverte	oui	néguentropie	oui	oui	oui	Économie (matière - énergie)

Source : L'auteur

Nous avons évoqué dans le tableau précédent les systèmes de la valeur. Ces systèmes permettent de trouver le surplus et la relation des prix relatifs pour chaque bien. Lesquelles peuvent être calculées à partir de quelques méthodes algébriques et matricielles comme les valeurs et les vecteurs propres, la décomposition de valeur singulière et un système des équations réflexives.

Les valeurs et les vecteurs propres des matrices carrées seront trouvés à travers des calculs simples sur le logiciel Matlab (annexe VIII.B).

Les prix des biens écologiques en utilisant matrices non-carres seront trouvés à travers d'un système des équations réflexives proposées pour Robbie Andrew en 2011 qui ont été automatisées en utilisant *Matlab Integrated Development Environment (IDE)* (on peut trouver plus de renseignements en annexe VIII.A).

8.2 Une typologie des structures cycliques ou assez cycliques

1. **Le flux circulaire de type 1 peut être défini comme un cycle fermé sans surplus, ou cycle à fermeture entropique, sans mesure des polluants, sans mesure des intrants primaires.**

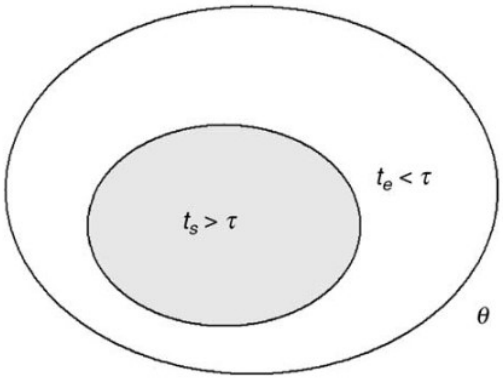
La première loi de la thermodynamique propose un bouclage de matière et de l'énergie, qui peuvent être interprétés comme une fermeture de flux (Ayres, 1969,1978) et dont tous les flux sont stockés, recyclés et réutilisés dans un compartiment de la biosphère.

L'énergie stockée peut être associée à l'énergie libre de Gibbs *(G)* ou enthalpie libre,

$$\Delta G = \Delta H + T\Delta S \tag{8.2.1}$$

La variation d'énergie libre de Gibbs mesure donc la *partie* de l'énergie d'un système qui produit un travail. En d'autres termes, à température (T) et pression (p) constante, l'énergie libre de Gibbs permet d'évaluer la partie de l'énergie potentielle du système (son enthalpie, ΔH) qui n'est pas dissipée sous forme de chaleur (son entropie, ΔS)[88].

Figure 8.2.1 : La variation d'énergie libre de Gibbs



Source : Ho, 2005

Comme l'expose la figure 8.2.1. L'énergie libre de Gibbs peut être modifiée en raison de la variation de la température. Colin McClare en 1971 fait un classement de la température (θ) en deux catégories : les énergies stockées (t_s) et les énergies d'échange ou non stockées (t_θ). Si l'énergie qui reste dans un état de non-équilibre (τ) est supérieure à (t_θ), le système échange énergie avec l'environnement pour avoir

[88] $\Delta S = klogD$ k est la constante de Boltzmann (1.38064852(79)×10−23 J/K). D est une mesure quantitative du désordre atomique.

l'équilibre. Au contraire, si l'énergie qui reste dans un état de non-équilibre (τ) est inférieure à (t_s), le système stocké énergie.

Définition du cycle: La figure 8.2.2 montre deux processus, ils sont représentés à travers du parcours de deux processus du grand cycle selon notre classement de *grand* et *petit cycle* (cf. section 2.1), il s'agit de processus deux non gérés par l'homme dans un système serré aux termes thermodynamiques.

Généralités : Le flux circulaire peut être défini comme un cycle serré sans surplus ou fermeture entropique, sans mesure des polluants et sans mesure des intrants primaires.

Nous voudrions donner ensuite une définition du cycle en précisant le processus et les transferts de la structure. Nous devons préciser que dans notre modèle opère un service de restitution ou de *réversion* des ressources naturelles en forme autonome.

Définitions des processus et des transferts de production jointe (Réaction d'oxydation et de réduction (REDOX) de l'azote dans l'atmosphère):

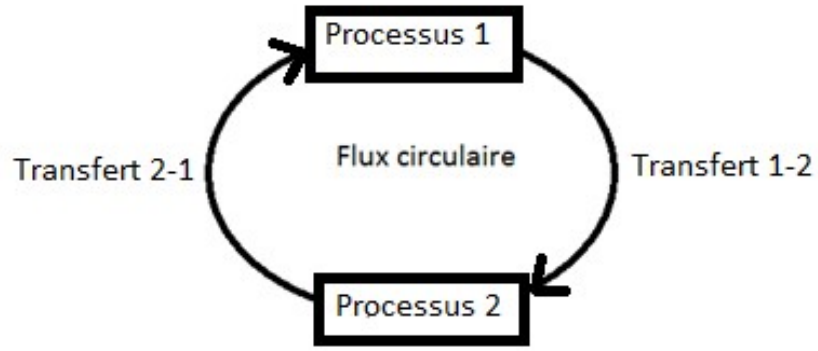
Processus 1 : Un processus écologique de réduction de dioxyde d'azote en utilisant l'atmosphère comme *fond*, dont la fonction, sont de reproduire au d'augmenter *le capital écologique* (ressource 2, diazote), en utilisant un bien du capital écologique (ressource 1, dioxyde d'azote).

Transfert 1-2 : Le transfert entre le processus 1 et le processus 2 peuvent être caractérisés comme une sortie du *capital écologique* (ressource 2, diazotée) du processus 1 vers le processus 2, qui l'utilise comme un intrant.

Processus 2 : Un processus écologique oxydation en utilisant l'atmosphère comme *fond* dont la fonction sont de reproduire au d'augmenter du *capital écologique* (ressource 1, dioxyde d'azote), en utilisant un bien du capital écologique (ressource 2, diazotée).

Transfert 2-1 : Le transfert entre le processus 2 et le processus 1 peut être caractérise comme une sortie du *capital écologique* (ressource 1, dioxyde d'azote) du processus 2 vers le processus 1, qui l'utilise comme un intrant.

Figure 8.2.2 : Définition graphique du système 2x2



Source : L'auteur

Formalisation de la structure :

Sraffa(1960) proposé un modèle d'équation linéaire pour décrire les relations d'échange entre les commodités d'une économie. Nous avons adapté ce cadre pour l'utiliser avec deux processus de la *nature* en utilisant notre cadre matricielle décomposable (cf. au début de ce chapitre) :

Tableau 8.2.1 : Les deux processus naturels dans un cadre décomposable

	INPUT		OUTPUT	
	Dioxyde d'Azote	Diazote		
Nature				
Processus 1	a_{11}	0	0	b_{12}
Processus 2	0	a_{22}	b_{21}	0
Économie				
Traitement déchet				

Source : L'auteur

Cette relation peut être représentée comme suit :

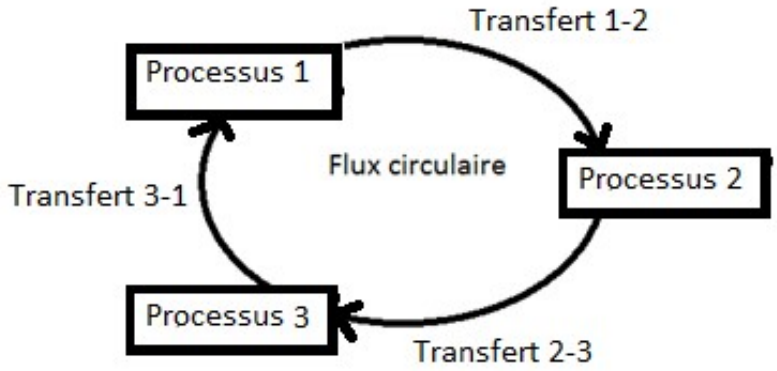
$$100\,p_1 = 200\,p_2 \qquad (8.2.2)$$
$$200\,p_2 = 100\,p_1$$

Le système l'équation 1 peut être simplifié comme $a_{11} = 2b_{12}$. Cette relation montre que 100 tonnes de dioxyde d'azote (ressource 1) peuvent produire, à travers un processus de réduction, 200 tonnes de diazote (ressource 2). Dans le même sens, les équations expriment que $2a_{22} = b_{21}$ dont, 200 tonnes de diazotée (ressource 1) peut être à travers du processus d'oxydation produire 100 tonnes de dioxyde d'azote (ressource 2). Un système de deux équations simultanées a été proposé pour Patterson dans

l'année 2012 en utilisant le concept d'Emergy[89] dont un écosystème de deux plants qui utilise l'énergie solaire pour produire biomasse.

Dans le prochain exemple introduit, nous avons introduit un troisième processus, en utilisant l'atmosphère comme *fond* dont la fonction est d'augmenter *le capital écologique* (ressource 1, dioxyde d'azote) et utilise des biens du capital écologique (ressource 3 et ressource 2).

Figure 8.2.3: Définition graphique du système 3 processus et 3 transferts



Source : L'auteur

Le système peut être représenté pour les équations linéaires suivantes :

$$\begin{aligned} 240p_1 + 12p_2 + 18p_3 &= 450p_1 \\ 90p_1 + 6p_2 + 12p_3 &= 21p_2 \\ 120p_1 + 3p_2 + 30p_3 &= 60p_3 \end{aligned} \tag{8.2.3}$$

La ressource 1 peut être utilisée comme numéraire pour résoudre le système des équations donc (p_1=1). Ensuite les solutions peuvent être présentes comme suit:

p_1=1
p_2=10
p_3=5

Les équations montrent les prix relatifs des commodités donc, 1 tonne de dioxyde d'azote (ressource 1) est dix fois plus coûteuse que le diazote (ressource 2) et cinq fois plus coûteuse que la ressource 3. En résumé, nous avons construire un premier modèle qui décrit un système imaginaire de flux d'azote dans l'atmosphère que peut s'auto alimenter et survivre sur le long terme, ce qui correspond a un état stationnaire. On peut annoncer brièvement que ce concept correspond à l'absence des variations dans l'activité de processus et des quantités de ressources dans le longterme. On pourrait se demander à ce stade : quel type systèmes considère la variation dans l'activité de processus et des quantités de ressources ? Nous nous proposons maintenant d'étudier des modèles que considère cette variation dans les ressources à travers de la génération d'un surplus et de l'entropie dans le système.

[89] L'Emergy est un concept énergétique élaboré par HT Odum, qui donne la quantité d'énergie solaire directe et indirecte incorporée dans un bien naturel (Odum, 1996).

2. **Le flux circulaire de type 2 peut être défini comme un cycle ouvert avec surplus qui génère de l'entropie, sans mesure des polluants et sans mesure des intrants primaires.**

Le flux circulaire est une combinaison de deux processus du *grand cycle et de cycle moyen* montré la figure 8.2.4. De plus, dans notre modèle opère un service de restitution ou de *réversion* (δ) des ressources naturelles en forme autonome.

Définitions de processus et transfert de production jointe avec surplus:

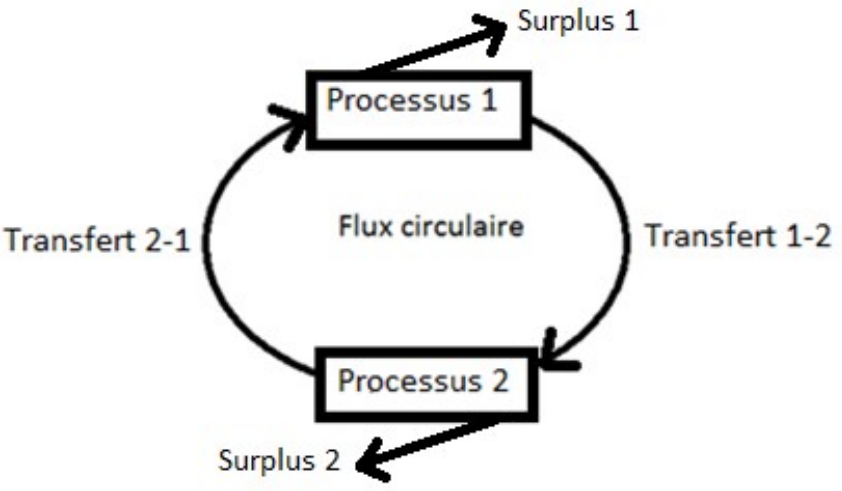
Processus 1 : Un processus écologique qui utilise la biosphère comme *fond,* dont la fonction, sont de reproduire au d'augmenter *le capital écologique* (ressource 1) avec surplus, en utilisant un bien du capital écologique (ressource 2) et la ressource 1.

Transfert 1-2 : Le transfert entre le processus 1 et le processus 2 peuvent être caractérisés comme une sortie du *capital écologique* (ressource 1) du processus 1 vers le processus 2, qui l'utilise comme un intrant.

Processus 2 : Un processus écologique en utilisant la biosphère comme fond, dont la fonction, sont de reproduire au d'augmenter *le capital écologique* (ressource 2) avec surplus, en utilisant un bien du capital écologique (ressource 1) et la ressource 2.

Transfert 2-1 : Le transfert entre le processus 2 et le processus 1 peuvent être caractérisés comme une sortie du *capital écologique* (ressource 2) du processus 2 vers le processus 1, qui l'utilise comme un intrant.

Figure 8.2.4: Définition graphique du système 2x2 avec surplus



Source : L'auteur

Le système peut être représenté pour les équations linéaires suivantes :

$$280p_1 + 12p_2 = 575p_1$$
$$120p_1 + 8p_2 = 20p_2 \qquad (8.2.4)$$

Le système peut représenter à travers une structuration de type Sraffian en considérant les intrants A, les sorties B, le surplus π et le prix p comme, $Ap\ (1+\pi) = Bp$

La détermination du taux de profit uniforme est celle qui permettra la répartition du surplus et la formation des prix comme :

$$\begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_1 \\ p_2 \end{bmatrix} (1+\pi) = \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} \\ b_{21} & b_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_1 \\ p_2 \end{bmatrix} \tag{8.2.5}$$

En remplaçant les nombres qui accompagnent le prix de l'équation 8.2.4 on trouvera :

$$\begin{bmatrix} 280 & 12 \\ 120 & 8 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_1 \\ p_2 \end{bmatrix} (1+\pi) = \begin{bmatrix} 575 & 0 \\ 0 & 20 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_1 \\ p_2 \end{bmatrix} \tag{8.2.6}$$

Nous nous proposons maintenant de calculer le prix et le surplus en utilisant la définissons $T \equiv B^{-1}A$ pour plus de commodité (cf. section 5.3). Car, il est possible de résoudre l'équation précédant à travers de T, cette solution peut être obtenue comme suit :

$Tp = \lambda p$ où $\lambda = 1/(1+\pi)$

Les solutions pour λ peuvent être obtenues en posant le déterminant $|\ \mathbf{T} - \lambda \mathbf{I}\ | = 0$. Ceci fournit deux racines (O'Connor, 1993b; Douguet *et al.* 2008) :

Les valeurs propres λ au diagonal.

$$\begin{bmatrix} 0.8 & 0 \\ 0 & 0.0870 \end{bmatrix}$$

Les vecteurs propres des prix.

$$\begin{bmatrix} 0.0665 & -0.0521 \\ 0.9978 & 0.9986 \end{bmatrix}$$

Nous trouverons $\lambda_{\max} = 0.8$ qui représente la valeur propre maxime. Ensuite nous pouvons calculer les surplus comme [(1/0.8)-1]*100 =25, nous pouvons annoncer brièvement comme suit l'hypothèse d'égalité de taux de surplus[90] entre mes processus (surplus1=surplus2= π =25%), cette hypothèse va être rejeté dans le chapitre XIII. Nous pouvons remarquer que le signe de surplus est positif donc le processus va donner de surplus *'salarie'* aux propriétaires du processus. On pourrait se demander : quelles sont les règles de distribution de surplus implicitement sous-jacent aux processus naturels ? Cette question a été analysée aux chapitres V et VI.

Nous pouvons maintenant vérifier les prix relatives des ressources comme suit:

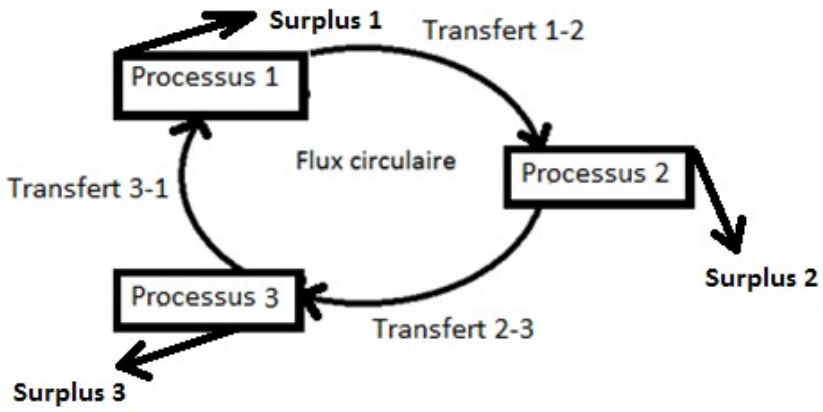
$p_1 = 1$
$p_2 = 15$

[90] Le hypothèse d'égalite de taux de surplus à été déjà étudie dans le chapitre V.

Les résultats montrent que les prix relatifs des marchandises donc, 1 tonne de ressource 1 est quinze fois plus coûteuse que la ressource 2.

Nous voulons introduire un troisième processus, en utilisant l'atmosphère comme *fond* dont la fonction est d'augmenter *le capital écologique* (ressource 1), qui utilise des biens du capital écologique (ressource 3 et ressource 2).

Figure 8.2.5: Définition graphique du système 3 processus et 3 transferts avec surplus



Source : L'auteur

Le système peut être représenté pour les équations linéaires suivantes :

$$\begin{aligned} 280p_1 + 12p_2 + 18p_3 &= 450p_1 \\ 90p_1 + 6p_2 + 12p_3 &= 21p_2 \\ 120p_1 + 3p_2 + 30p_3 &= 60p_3 \end{aligned} \tag{8.2.7}$$

Le système peut être formalisé à travers d'une structuration Sraffianne qui lui présente sous forme matricielle, avec *surplus 1= surplus 2 = surplus 3=* π comme suit:

$$\begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_1 \\ p_2 \\ p_3 \end{bmatrix} .(1+\pi) = \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} & b_{13} \\ b_{21} & b_{22} & b_{23} \\ b_{31} & b_{32} & b_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_1 \\ p_2 \\ p_3 \end{bmatrix} . \tag{8.2.8}$$

En remplaçant les nombres qui accompagnent le prix dans l'équation 8.2.7, on trouve :

$$\begin{bmatrix} 240 & 12 & 18 \\ 90 & 6 & 12 \\ 120 & 3 & 30 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_1 \\ p_2 \\ p_3 \end{bmatrix} .(1+\pi) = \begin{bmatrix} 450 & 0 & 0 \\ 0 & 21 & 0 \\ 0 & 0 & 60 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_1 \\ p_2 \\ p_3 \end{bmatrix} \tag{8.2.9}$$

Nous réutilisons $T \equiv B^{-1}A$ pour trouver les prix et les surplus et λ. Nous trouverons la valeur propre $\lambda_{\max} = 0.94564$ en conséquence les surplus sont [(1/0.945)-1]*100 =0.0582 donc *surplus* 1= *surplus* 2 = $\pi = 5.82\%$.

Comme nous avons déjà vu, la ressource 1 peut être utilisée comme numéraire pour résoudre le système des équations donc ($p_1 = 1$). Les solutions peuvent être présentes comme suit :

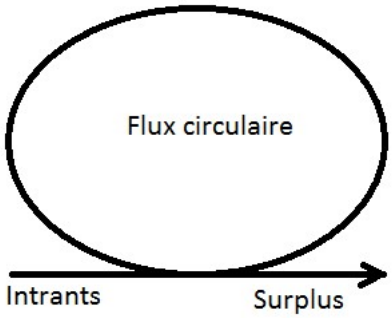
$p_1 = 1$
$p_2 = 7.47$
$p_3 = 5.32$

Finalement, les équations montrent les prix relatifs des commodités (détaillé des résultats en annexé VIII.B), 1 tonne de ressource 1 est 7.47 fois plus coûteuse que la ressource 2 et 5.32 fois plus coûteuse que la ressource 3. En résumé, nous avons construit un modèle de production jointe de trois processus qui décrit un système imaginaire qui génère un surplus, nous avons exploré les règles de distribution de surplus d'un point de vue institutionnel dans le chapitre VI. Nous voulons explorer ensuite un modèle qu'incluent des intrants primaires dans une matrice non carrée.

3. Le flux circulaire de type 3 peut être défini comme un cycle ouvert qui génère surplus et entropie, sans mesure des polluants, mais avec mesure des intrants primaires.

Ce flux circulaire est une combinaison de deux processus et de trois ressources. Dans notre modèle non carré opère un service de restitution ou de *réversion* (δ) des ressources naturelles en forme autonome. Donc, la définition graphique et algébrique peut être envisagée comme suit:

Figure 8.2.6: Flux circulaire d'une combinaison de deux processus de grand cycle et de cycle moyen



Source : L'auteur

Définitions de processus et transfert de production jointe (intrants et surplus):

Processus 1 : Un processus écologique en utilisant la biosphère comme *fond*, dont la fonction, sont de reproduire au d'augmenter *le capital écologique* (ressource 1) avec surplus, qui utilise un bien du *capital écologique* (ressource 2), la ressource 1 et une autre ressource 3 (intrant).

Transfert 1-2 : Le transfert entre le processus 1 et le processus 2 peut être caractérise comme une sortie du *capital écologique* (ressource 2) du processus 1 vers le processus 2, qui l'utilise comme un intrant.

Processus 2 : Un processus écologique qui utilise la biosphère comme *fond*, dont la fonction, est de reproduire au d'augmenter *le capital écologique* (ressource 2) avec la production un surplus, en utilisant le bien du capital écologique (ressources 1), la ressource 2 et une autre ressource 3 (intrant).

Transfert 2-1 : Le transfert entre le processus 2 et le processus 1 peut être caractérise comme une sortie du *capital écologique* (ressource 1) du processus 2 vers le processus 1, qui l'utilise comme un intrant.

Nous voulons explorer des solutions graphiques pour notre système comme suit.

Définitions de processus et transfert dans le logiciel ePLANETe :

La figure ci-dessous montre à gauche une liste de processus et de transfert du cycle de l'azote dans l'agriculture. La figure dans la colonne du centre exprime le processus de l'azote dans les praires, qui correspond au processus 1 de notre système ci-dessus. La colonne du centre montre les intrants du processus (*From*), une définition de processus, la liste des *inputs*, liste des *outputs* et le *fond* ou substrat physique du processus et les sorties du processus (*To*). La figure dans la colonne aux droites exprime le lien croisse (*crosslinks*) avec la galerie des indicateurs ou *KIKs* (cf. annexe VIII.C sur la structure des cycles et des cascades chez *ePLANETe*).

Cette structure peut être montrée dans l'écran comme :

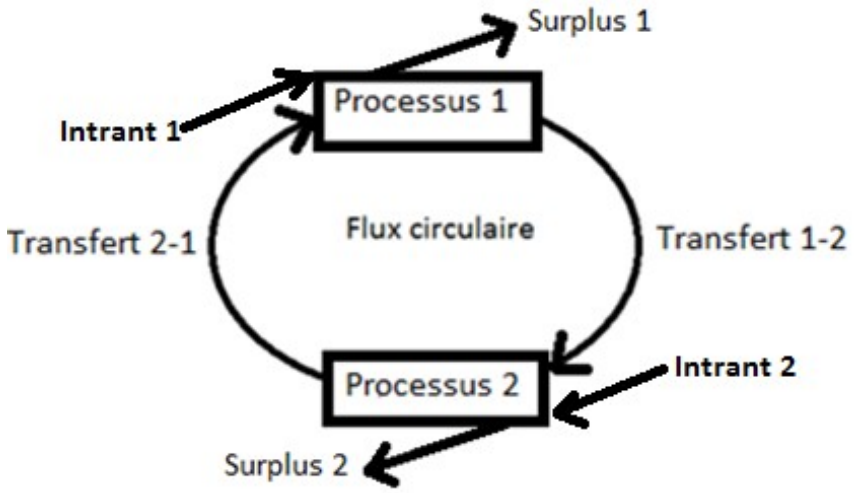
Figure 8.2.7 : Les processus et les transferts dans le logiciel ePLANETe

Source : L'auteur en utilisant le structure d'ePLANETe [91]

La proposition expliquée dans la figure 8.2.7 est composée pour des processus, des transferts et de fond a été caractérisé dans la figure 8.2.8.

[91] Pour développement détaillé sur la structure d'*eplanete*, consulter le site: *https://proxy.eplanete.net/galleries/cc/node/2268/2311/grain* (site consulté le 5 juin 2015).

Figure 8.2.8 : Système avec surplus, entropie, sans polluants et avec des intrants primaires.



Source : L'auteur

Le modèle peut être simplifié en utilisant un seul type d'intrant, dont Intrant 1=Intrant 2. Ensuite comme dans les deux cas précédents le système peut être représenté pour les équations linéaires suivantes :

$$\begin{aligned} 280p_1 + 12p_2 + 12p_3 &= 575p_1 \\ 120p_1 + 8p_2 + 24p_3 &= 20p_2 \end{aligned} \tag{8.2.10}$$

En adition le système peut être représenté à travers d'un système de type Sraffian. Cette formalisation permettre de présenter les équations 8.2.10 sous forme matricielle, avec *surplus* 1= *surplus* 2 = π comme suit :

$$\begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_1 \\ p_2 \\ p_3 \end{bmatrix} (1+\pi) = \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} & b_{13} \\ b_{21} & b_{22} & b_{23} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_1 \\ p_2 \\ p_3 \end{bmatrix} \tag{8.2.11}$$

En remplaçant les nombres qui accompagnent prix des équations 8.2.11.

$$\begin{bmatrix} 280 & 12 & 12 \\ 120 & 8 & 24 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_1 \\ p_2 \\ p_3 \end{bmatrix} (1+\pi) = \begin{bmatrix} 575 & 0 & 0 \\ 0 & 200 & \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_1 \\ p_2 \\ p_3 \end{bmatrix} \tag{8.2.12}$$

Considérons que les méthodes traditionnelles de valeur et vecteur propres déjà explorées ne permettent pas de calculer les prix des matrices non carrées. On pourrait se demander : quel type de méthode permet d'obtenir les prix des matrices non carrées ? Nous utiliserons les méthodes réflexives (Patterson, 2014) qui permettent de calculer le prix des matrices non carrées.

$p_1 = 1$

$p_2 = 21.9138$
$p_3 = 5.9015$

Finalement les équations montrent les prix relatifs des commodités (détaillé des résultats en annexé VIII.B), 1 tonne de ressource 1 est 21.91 fois plus coûteuse que la ressource 2 et 5.9015 fois plus coûteuse que la ressource 3. Il peut être intéressant de noter que le bien du capital écologique (ressources 1), ce qui a été utilisé comme input dans le processus 1 est plus cher que les autres biens. De surcroît, ce bien a été reproduit par le processus qui fait la *réversion* des ressources naturelles en forme autonome.

Nous explorerons dans le quatrième flux les prix et les surplus d'un système de valeur. Il est composé de deux processus économiques où la *réversion* (δ) permet de renouvelé un ressource naturel au travers d'un processus économique (cf. section 8.1).

4. Le flux circulaire de type 4 peut être défini comme un cycle assez serré qui produit un surplus et des polluants, les intrants primaires sont mesurés.

Le système peut être défini comme un flux circulaire d'une combinaison de deux processus économiques selon notre classement au début du chapitre**.** La réversion permet de renouveler une ressource naturelle. Elle fonctionne à travers d'un processus économique qu'utilisé des ressources naturelles.

Le système assez fermé échange la matière et l'énergie avec l'environnement hors du système pour générer un même surplus économique, O'Connor en 1993 propose différents surplus pour chaque type de processus.

Considérons d'abord la dépendance du système cyclique des *inputs* du capital économique pour la génération d'un bien économique et un déchet ou polluant.

Définitions de processus et transfert de production jointe (intrants, déchets et surplus):

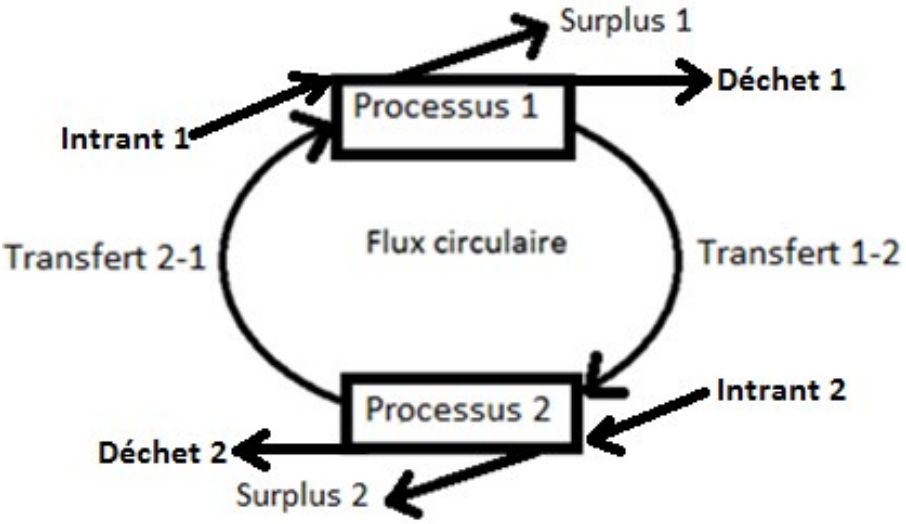
Processus 1 : Un processus économique en utilisant la ville comme *fond* dont la fonction est de produire *un capital économique* (ressource 2 ou R_2) et un déchet économique (ressource 4 ou R_4) avec surplus, qui utilise le bien du capital écologique (ressources 1 ou R_1), la ressources 2 et une autre ressource 3 (R_3 ou intrant).

Transfert 1-2 : Le transfert entre le processus 1 et le processus 2 peut être caractérise comme une sortie du *capital écologique* (ressource 2) du processus 1 vers le processus 2, qui l'utilise comme un intrant.

Processus 2 : Un processus économique qui utilise la ville comme *fond* dont la fonction est de produire *un capital économique* (ressource 2) et un déchet économique (ressource 4) avec la génération d'un surplus, en utilisant un bien du capital écologique (ressource 2) et une autre ressource 3 (intrant).

Transfert 2-1 : Le transfert entre le processus 2 et le processus 1 peut être caractérise comme une sortie du *capital écologique* (ressource 1) du processus 2 vers le processus 1, qui l'utilise comme un intrant.

Figure 8.2.9: Système sans surplus avec polluants et intrants primaires



Source : L'auteur

Sraffa (1960) proposé un modèle d'équation linéaire pour décrire les relations d'échange entre las marchandises d'une économie. Nous avons adapté ce cadre pour l'utiliser avec deux processus économiques et quatre ressources en utilisant notre structure matricielle décomposable :

Tableau 8.2.2 : Les deux processus économiques dans un cadre décomposable

	INPUT				OUTPUT			
	R_1	R_2	R_3	R_4				
Nature								
Économie								
Processus 1	a_{11}	a_{12}	a_{13}	0	0	b_{12}	0	b_{14}
Processus 2	0	a_{22}	a_{23}	0	0	b_{22}	0	b_{24}
Traitement déchet								

Source : L'auteur

Le modèle peut être simplifié en utilisant un seul type d'intrant et un seul type du déchet, dont Intrant 1=Intrant 2 et déchet 1= déchet 2.

Le système peut être présenté pour les équations linéaires suivantes :

$$\begin{aligned} 100p_1 + 280p_2 + 12p_3 + 0p_4 &= 575p_2 + 4p_4 \\ 0p_1 + 120p_2 + 8p_3 + 0p_4 &= 20p_2 + 12p_4 \end{aligned} \qquad (8.2.13)$$

Il pourra être formalisé à travers d'une structuration de type Sraffianne comme suit :

$$\begin{bmatrix} a_{11}\, a_{12}\, a_{13}\, a_{14} \\ a_{21}\, a_{22}\, a_{23}\, a_{24} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_1 \\ p_2 \\ p_3 \\ p_4 \end{bmatrix} (1+\pi) = \begin{bmatrix} b_{11}\, b_{12}\, b_{13}\, b_{14} \\ b_{21}\, b_{22}\, b_{23}\, b_{24} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_1 \\ p_2 \\ p_3 \\ p_4 \end{bmatrix} \tag{8.2.14}$$

En remplaçant les nombres qui accompagnent le prix des équations 8.2.13, le système s'écrit comme :

$$\begin{bmatrix} 100280120 \\ 0\ \ 120\ 8\ 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_1 \\ p_2 \\ p_3 \\ p_4 \end{bmatrix} (1+\pi) = \begin{bmatrix} 05750\ 4 \\ 0\ 20\ 012 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_1 \\ p_2 \\ p_3 \\ p_4 \end{bmatrix} \tag{8.2.15}$$

Pour calculer les prix des matrices nos carrées, nous avons utilisé les méthodes réflexives (patterson, 2014). Cette formule permet de représenter les prix relatifs comme suit :

$p_1 = 1$
$p_2 = 0.3186$
$p_3 = 0.4533$
$p_4 = 2.9518$

Finalement les équations montrent les prix relatifs des marchandises (détaillé des résultats en annexé VIII.B), 1 tonne de ressource 1 est 0.3186 fois moins coûteuse que la ressource 2, 0.4533 fois moins coûteuse que la ressource 3 et 2.9518 fois plus coûteuse que la ressource 4. Nous pouvons remarquer que le prix relatif du déchet (ressource 4) est le moins cher du système. Nous pouvons déclarer que certains flux sont bouclés, mais d'autres seront jetés dehors du système comme le déchet pas cher. Nous pouvons constater immédiatement que cette structure est similaire au premier cas de figure propose par Jason Moore (2015) qui a été analyse dans le chapitre VI. Ce mécanisme d'*instrumentalisation* considère deux étapes : l'*internalisation* de la nature dans le système de valeur, l'*externalisation* des déchets et l'*élargissement* des frontières de l'exploitation. Cette démarche permet de reproduire l'*asymétrie* en la négociation dynamique des frontières entre l'économie et l'environnement comme a été décrit dans le livre *Is Capitalism sustainable?* (O'Connor, 1994).

Nous voulons explorer dans la section 8.3 un deuxième groupe des systèmes de la valeur. Ils permettent de nous donner une typologie de processus en cascade thermodynamique.

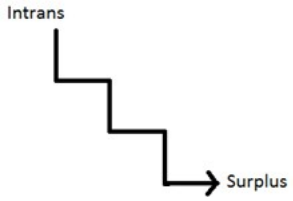
8.3 Une typologie des cascades : entropie versus néguentropie

5. La cascade de type 1 est avec production jointe

D'abord, nous voulons commencer avec un système de la valeur non carrée de deux processus, trois ressources et un seul transfert entre le processus 1 et 2 sans réversion.

Définitions des processus et des transferts avec production jointe (intrants et surplus):

Rappel (cf. section 2.1) : La cascade est définie comme un flux linéaire descendant comprenant un certain nombre de paliers (relation *processus-transferts-processus*) et générant des surplus et des polluants. Les intrants primaires sont mesurés.



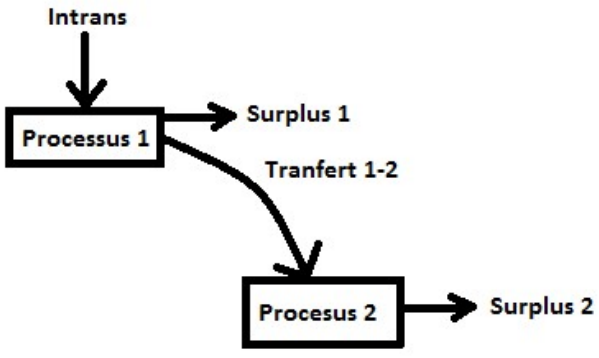
Cette définition peut illustrer les processus et les transferts suivants :

Processus 1 : Un processus écologique qui utilise la forêt comme *fond* dont la fonction est de produire *un capital écologique* (ressource 2) avec surplus, en utilisant le bien du capital *écologique* (ressources 1 ou R_1) comme intrant.

Transfert 1-2 : Le transfert entre le processus 1 et le processus 2 peut être caractérisé comme une sortie du *capital écologique* (ressource 2 ou R_2) du processus 1 vers le processus 2, qui l'utilise comme un intrant.

Processus 2 : Un processus économique qui utilise la ville comme *fond* dont la fonction est de produire un capital économique (ressource 3 ou R_3) avec surplus, en utilisant le bien du capital *écologique* (ressource 2).

Figure 8.3.1 : Définition graphique du système 2 processus et 1 transfert



Source : L'auteur

Nous pouvons constater immédiatement l'absence d'un processus de réversion (δ) comme dans les quatre premiers cas de la typologie. Le système peut être représenté par les équations linéaires suivantes :

$$10p_1 = 15p_2$$
$$8p_2 = 12p_3 \qquad (8.3.1)$$

Le système peut être formalisé à travers d'une structuration matricielle en considérant les intrants A, les sorties B, le surplus π et le prix p comme. Nous avons adapté ce cadre pour l'utiliser avec deux processus et trois ressources en utilisant notre cadre matricielle décomposable :

Tableau 8.3.1 : Les deux processus économiques dans un cadre décomposable

	INPUT		OUTPUT	
	R_1 R_2	R_3		
Nature				
Processus 1	a_{11} 0	0	0 b_{12}	0
Économie				
Processus 2	0 a_{22}	0	0 0	b_{23}
Traitement déchet				

Source : L'auteur

Le système peut être représenté à travers d'une structuration Sraffian comme suit :

$$\begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_1 \\ p_2 \\ p_3 \end{bmatrix} (1+\pi) = \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} & b_{13} \\ b_{21} & b_{22} & b_{23} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_1 \\ p_2 \\ p_3 \end{bmatrix} \qquad (8.3.2)$$

En remplaçant les nombres qui accompagnent le prix en 8.3.1.

$$\begin{bmatrix} 10 & 0 & 0 \\ 0 & 8 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_1 \\ p_2 \\ p_3 \end{bmatrix} (1+\pi) = \begin{bmatrix} 0 & 15 & 0 \\ 0 & 0 & 12 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_1 \\ p_2 \\ p_3 \end{bmatrix} \qquad (8.3.3)$$

Nous avons utilisé les méthodes réflexives pour calculer les prix de matrices non carrées (patterson, 2014) . Les prix relatifs obtenus sont les suivants:

$$p_1 = 1$$
$$p_2 = 0.6667$$
$$p_3 = 0.4444$$

Les résultats montrent les prix relatifs des commodités (détaillé des résultats en annexé VIII.B), 1 tonne de ressource p_1 est 0.6667 fois moins coûteuse que la ressource p_2 , 0.4444 fois moins coûteuse que la ressource p_3 . Ce système montre que les ressources naturelles 1 et 2 sont moins coûteuses que le capital économique produit dans le processus 3. Ce type de résultat est typiquement la valeur des ressources

naturelles dans une économie d'appropriation du capital naturel. La cascade 6 explorer un outre système de valeur non carrée. Elle est composée de trois processus économiques.

6. La cascade de type 2 est avec production jointe

La structure en cascade prochaine intègre des formes de prélèvement de l'économie sur le capital naturel, en tant que matière primaire pour la production de l'économie (processus 1 et 3) et en tant que lieu ou fonds de décharge des déchets des activités économiques et un processus de réversion (δ) ou recyclage qui a été opérée par l'économie.

Définitions de processus et de transfert sans production jointe en utilisant des intrants, en générant des déchets et un surplus économique:

Processus 1 : Un processus économique qui utilise la ville comme *fond* dont la fonction est de produire *un capital économique* (ressource 2) et un déchet économique (ressource 4) avec surplus, en utilisant le bien du capital écologique (ressources 1) comme intrant.

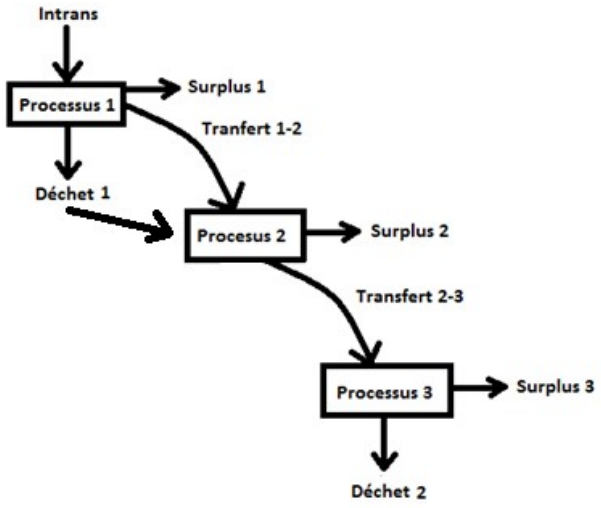
Transfert 1-2 : Le transfert entre le processus 1 et le processus 2 peuvent être caractérisés comme une sortie du *capital écologique* (ressource 2) du processus 1 vers le processus 2, qui l'utilise comme un intrant.

Processus 2 : Un processus économique qui utilise la ville comme *fond* dont la fonction est de recycler un déchet économique (ressource 4) avec surplus et de produire une ressource économique (ressource 3).

Transfert 2-3 : Le transfert entre le processus 2 et le processus 3 peuvent être caractérisés comme une sortie du *capital économique* (ressource 3) du processus 2 vers le processus 3, qui l'utilise comme un intrant.

Processus 3 : Un processus économique qui utilise la ville comme *fond* dont la fonction est de produire *un capital économique* (ressource 5) et un déchet économique (ressource 4) avec surplus, qu'utilise un bien du capital économique (ressource 3).

Figure 8.3.2 : Définition graphique du système 3x3 en cascade



Source : L'auteur

Le modèle peut être simplifié en utilisant un seul type d'intrant 1 et un seul déchet final 5. Le système peut être représenté pour les équations linéaires suivantes :

$$\begin{aligned} 30p_1 &= 20p_2 + 14p_4 \\ 10p_4 &= 8p_3 \\ 7p_3 &= 2p_4 + 5p_5 \end{aligned} \tag{8.3.4}$$

En adition, le système de valeur peut être présent sous forme matricielle comme suit :

$$\begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} & a_{15} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} & a_{25} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{34} & a_{35} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_1 \\ p_2 \\ p_3 \\ P_4 \\ p_5 \end{bmatrix} (1+\pi) = \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} & b_{13} & b_{14} & b_{15} \\ b_{21} & b_{22} & b_{23} & b_{24} & b_{25} \\ b_{31} & b_{32} & b_{33} & b_{34} & b_{35} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_1 \\ p_2 \\ p_3 \\ P_4 \\ p_5 \end{bmatrix} \tag{8.3.5}$$

En remplaçant les nombres qui accompagnent le prix dans le système d'équations en 8.3.4.

$$\begin{bmatrix} 30 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 10 & 0 \\ 0 & 0 & 7 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_1 \\ p_2 \\ p_3 \\ P_4 \\ p_5 \end{bmatrix} (1+\pi) = \begin{bmatrix} 0 & 20 & 0 & 14 & 0 \\ 0 & 0 & 8 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2 & 5 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_1 \\ p_2 \\ p_3 \\ P_4 \\ p_5 \end{bmatrix} \tag{8.3.6}$$

Comme nous avons déjà utilisé dans les autres systèmes, les méthodes réflexives (patterson, 2014) permettent de calculer le prix et l'efficience des matrices non carrées.

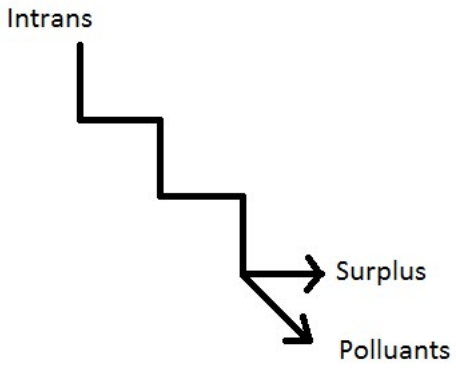
$$\begin{aligned} p_1 &= 1 \\ p_2 &= 0.8824 \\ p_3 &= 1.1025 \\ p_4 &= 0.8824 \\ p_5 &= 8.4629 \end{aligned}$$

Finalement les équations montrent les prix relatifs des commodités (détaillé des résultats en annexé VIII.B), 1 tonne de ressource 1 est 0.8824 fois moins coûteuse que la ressource 2, 1.1025 fois plus cher que la ressource 3, 0.8824 fois moins coûteuse que la ressource 4 et 8.4629 fois plus coûteuse que la ressource 5. Ensuite le prix plus coûteuse est du capital économique et des déchets qui ont été comptabilisés dans notre système de valeur comme un coût donc la quantité produite du capital économique et les surplus générés pour les processus doivent être suffisent pour payer les coûts de se débarrasser du déchet.

7. La cascade de type 3 est avec production jointe

Tout d'abord, dans cette structure la cascade peut être définie comme un flux linéaire qui permet de générer des surplus et des polluants. Les intrants primaires sont mesurés.

Figure 8.3.3 : Cascade avec production jointe avec intrants, surplus et déchets



Source : L'auteur

Les processus et transfert peuvent être définis et formalisés comme suit :

Définitions de processus et de transfert en utilisant la production conjointe avec intrants, surplus et déchets:

Processus 1 : Un processus écologique qui utilise la forêt comme *fond* dont la fonction est de *reproduire un capital écologique* (ressource 1) avec une génération de surplus, en utilisant le bien du capital écologique (ressources 1) comme intrant.

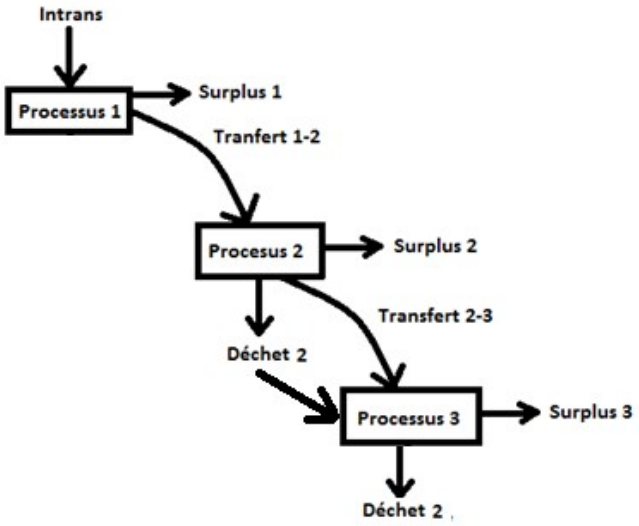
Transfert 1-2 : Le transfert entre le processus 1 et le processus 2 peuvent être caractérisés comme une sortie du *capital écologique* (ressource 1) du processus 1 vers le processus 2, qui l'utilise comme un intrant.

Processus 2 : Un processus économique qui utilise la ville comme *fond* dont la fonction est de produire un capital économique (ressource 3) avec surplus et un déchet (ressource 4), en utilisant le bien du capital écologique (ressource 1) et un bien du capital économique (ressource 3).

Transfert 2-3 : Le transfert entre le processus 2 et le processus 3 peuvent être caractérisés comme une sortie du *capital économique* (ressource 3) du processus 2 vers le processus 3, qui l'utilise comme un intrant.

Processus 3 : Un processus économique qui utilise la ville comme *fond* dont la fonction est d'éliminer un déchet économique (ressource 4) et de produire une petite quantité du déchet non éliminable (ressource 4) et un surplus économique, en utilisant un bien du capital économique (ressource 2). Nous avons représenté pour commodité dans le ressource 4, un déchet intermédiarie de la production économique qui peut être recyclé avec un déchet ultime ou non éliminable qui ne est pas recyclable.

Figure 8.3.4 : Système 3x3 avec production jointe



Source : L'auteur

Le système peut être formalisé pour les équations linéaires suivantes :

$$
\begin{aligned}
&3p_1 = p_1 \\
&2p_1 + p_2 = 2p_2 + p_3 \\
&p_2 + p_3 = 0.3p_3
\end{aligned}
\tag{8.3.7}
$$

Comme nous l'avons toujours fait pour les autres cases, le système peut être exprimé à travers d'une structuration matricielle. Nous avons adapté ce cadre pour l'utiliser avec un processus de la *nature* , un processus économique comme le métabolisme urbain et un processus pour se débarrasser du déchet en utilisant notre cadre matricielle décomposable :

Tableau 8.3.2 : Les trois processus dans un cadre décomposable

	INPUT			OUTPUT		
Nature Processus 1	a_{11}			b_{11}		
Économie Processus 2	a_{21}	a_{22}			b_{22}	b_{23}
Traitement déchet Processus 3		a_{32}	a_{33}			b_{33}

Source : L'auteur

Le système de valeur sera présent sous forme matricielle comme suit :

$$\begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix} . \begin{bmatrix} p_1 \\ p_2 \\ p_3 \end{bmatrix} .(1+\pi) = \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} & b_{13} \\ b_{21} & b_{22} & b_{23} \\ b_{31} & b_{32} & b_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_1 \\ p_2 \\ p_3 \end{bmatrix} . \tag{8.3.8}$$

En remplaçant les nombres qui accompagnent le prix du système des équations 8.3.7.

$$\begin{bmatrix} 3 & 0 & 0 \\ 2 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 1 \end{bmatrix} . \begin{bmatrix} p_1 \\ p_2 \\ p_3 \end{bmatrix} .(1+\pi) = \begin{bmatrix} 2 & 0 & 0 \\ 0 & 2 & 1 \\ 0 & 0 & 0.3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_1 \\ p_2 \\ p_3 \end{bmatrix} \tag{8.3.9}$$

Nous pouvons ensuite obtenir la valeur propre maxime λ (cf. annexe VIII.B sur la cascade de type III) correspond à 1.5 pour trouver les surplus comme : [(1/1.5)-1]*100 =-33.3, dont surplus 1= surplus 2 = π =-33.3%. La valeur négative de surplus représenté dans le domaine comptable un perdre d'un capital économique donc le système de la valeur n'est pas capable de générer un taux de profit pour le propriétaire de l'économie donc le fonctionnement doit être accompagné d'un système des prix administrés pour rémunérer le propriétaire du service d'élimination du déchet dans le processus 3.

Les prix relatifs ont été calculés comme suit (voir annexes VIII.A et VIII.B de la cascade simple avec de production jointe).

p_1 =1
p_2 =-2.75
p_3 =5

Les équations montrent les prix relatifs des commodités donc, 1 tonne de ressource 1 est 2.75 fois moins coûteuse que la ressource 2 et 5 fois plus coûteuse que la ressource 3. Ensuite comme dans dernier cas le prix plus coûteuse sont du capital économique. Ils ont être comptabilisé dans notre système de valeur comme un coût donc la quantité produite du capital économique et les surplus générés pour les processus doivent être sufficient pour payer les coûts de se débarrasser du déchet.

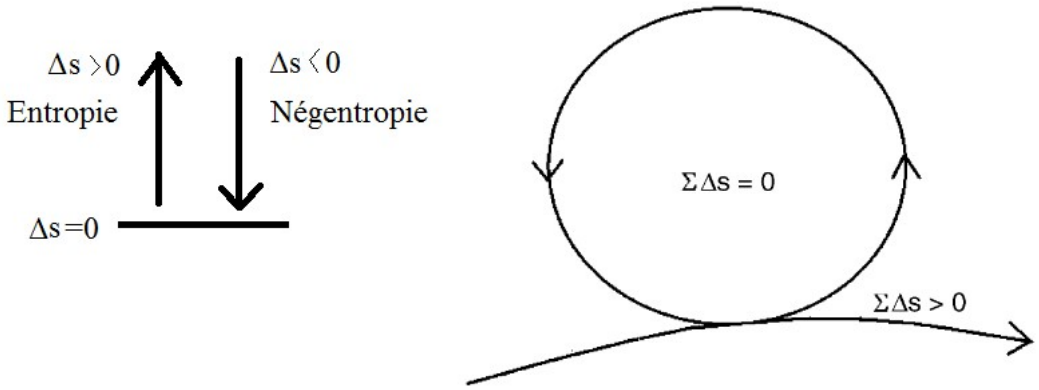
Nous voulons mettre en place le concept de néguentropie et des polluants dans notre structure 8 à travers d'une cascade qui considère un processus écologique et deux processus économiques.

8. La cascade de type 4 est avec production jointe, réversion d'entropie (*néguentropie*) et polluants

La cascade 8 peut être définie comme un flux linéaire qui permet de produire un surplus, des polluants. Les intrants primaires sont mesurés. Le système présenté en addition, un flux dans le sens contraire à l'entropie (une entropie négative).

Ensuite l'entropie (ΔS) d'un système isolé ne peut qu'augmenter (*mesure du désordre*) ou rester constante puisqu'il n'y a pas d'échange de chaleur avec le milieu extérieur. Mais dans notre modèle, la néguentropie ou entropie négative est un facteur d'organisation des systèmes physiques, voir figure ci-dessous gauche. Lequel a été proposé pour Erwin Schrödinger, dans son ouvrage *qu'est-ce que la vie ?* de 1944, puis développé et mis en perspective avec les travaux de Claude Shannon en 1948.

Figure 8.3.5 : Entropie versus néguentropie



Source : L'auteur (gauche) et Ho, 2005 (droite)

La figure ci-dessous (gauche et droite) montrée un système simple en équilibre à l'intérieur du cycle, la variation positive d'entropie est compensée pour la *néguentropie* de Schrodinger. Al extérieure du cycle de matière et d'énergie sont dissipées sur la forme de chaleur à travers d'une entropie positive.

Par la suite nous voulons donner une définition bioéconomique et algébrique des processus.

Définitions de processus et de transfert en utilisant la production jointe avec deux intrants , qui génère un surplus économique et un déchet:

Processus 1 : Un processus écologique qui utilise la forêt comme *fond,* dont la fonction, est de reproduire *un capital écologique* (ressources 1 ou R_1) avec un surplus en utilisant un bien comme le capital écologique (ressources 1) comme intrant et un bien ou capital thermodynamique comme l'énergie (ressource 2 ou R_2)

Transfert 1-2 : Le transfert entre le processus 1 et le processus 2 peuvent être caractérisés comme une sortie du *capital écologique* (ressource 1) du processus 1 vers le processus 2, qui l'utilise comme un intrant.

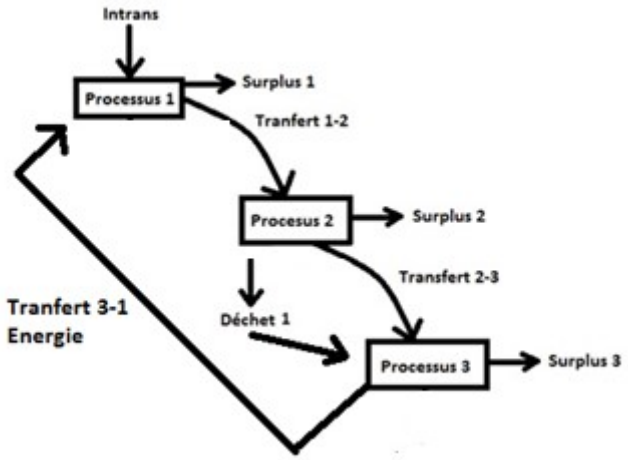
Processus 2 : Un processus économique qui utilise la ville comme *fond*, dont la fonction, est de produire un capital économique (ressource 3 ou R_3) avec surplus et un déchet (ressource 4 ou R_4), en utilisant le bien du capital écologique (ressource 1), un bien du capital économique (ressource 3) et un bien ou capital thermodynamique comme l'énergie (ressource 2).

Transfert 2-3 : Le transfert entre le processus 2 et le processus 3 peuvent être caractérisés comme une sortie du *capital économique* (ressource 3) du processus 2 vers le processus 3, qui l'utilise comme un intrant.

Processus 3 : Un processus économique qui utilise la ville comme *fond,* dont la fonction, est d'éliminer un déchet économique (ressource 4) et un surplus économique et de recycler une bien ou capital thermodynamique comme l'énergie (ressource 2), en utilisant un bien du capital économique (ressource 3) et une bien ou capital thermodynamique comme l'énergie (ressource 2).

Transfert 3-1 du numéraire énergie (*Négentropie*) : Le transfert entre le processus et le processus 1 peut être caractérisé comme une sortie de la thermodynamique comme l'énergie (ressource 4 du processus 3 vers le processus 1, qui l'utilise comme un intrant.

Figure 8.3.6 : Cascade avec production jointe, réversion d'entropie (*néguentropie*) et polluants



Source : L'auteur

Cette structure a permis de visualiser graphiquement la néguentropie entre le processus 3 et 1. Le système peut être fotmalisé par les équations linéaires suivantes :

$$\begin{aligned} &p_1 + p_2 = p_1 \\ &p_1 + p_2 + p_3 = p_3 + p_4 \\ &p_2 + 0.1p_3 + p_4 = p_2 \end{aligned} \tag{8.3.10}$$

Le système peut être formalisé à travers d'une structuration matricielle décomposable en considérant les intrants A, les sorties B comme suit :

Tableau 8.3.3 : Les deux processus économiques et un processus écologique dans un cadre décomposable

	INPUT				OUTPUT			
	R_1	R_2	R_3	R_4	R_1	R_2	R_3	R_4
Nature								
Processus 1	a_{11}	a_{12}	0	0	b_{11}	0	0	0
Économie								
Processus 2	a_{21}	a_{22}	a_{23}	0	0	0	b_{23}	b_{24}
Traitement déchet	0	a_{32}	a_{33}	a_{34}	0	b_{32}	0	0

Source : L'auteur

Le système non carré peut être présenté à travers d'une structuration Srrafian sous forme matricielle comme suit:

$$\begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{34} \end{bmatrix} . \begin{bmatrix} p_1 \\ p_2 \\ p_3 \\ p_4 \end{bmatrix} . (1+\pi) = \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} & b_{13} & b_{14} \\ b_{21} & b_{22} & b_{23} & b_{24} \\ b_{31} & b_{32} & b_{33} & b_{34} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_1 \\ p_2 \\ p_3 \\ p_4 \end{bmatrix}. \tag{8.3.11}$$

En remplaçant les nombres qui accompagnent le prix dans l'équation 8.3.10.

$$\begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0.1 & 1 & 1 \end{bmatrix} . \begin{bmatrix} p_1 \\ p_2 \\ p_3 \\ p_4 \end{bmatrix} . (1+\pi) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_1 \\ p_2 \\ p_3 \\ p_4 \end{bmatrix} \tag{8.3.12}$$

Les prix des matrices non carrées peuvent être calculés en utilisant Matlab (cf. annexe VIII.A de production joint). Les méthodes réflexives (patterson, 2014) permettent de calculer le prix des matrices non carrées.

$p_1 = 1$
$p_2 = 0.7214$
$p_3 = 0$
$p_4 = 1.2010$

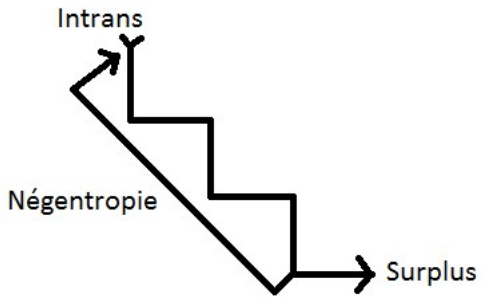
Les systèmes 8.3.12 a permis d'étudier les prix relatifs des commodités (détaillé des résultats en annexé VIII.B), 1 tonne de ressource 1 est 0.7214 fois moins coûteuse que la ressource 2, 0 fois plus coûteuse que la ressource 3 et 1.2010 fois plus coûteuse que la ressource 4. Nous pouvons note que le prix relative du déchet et plus grand que les autres prix donc nous pouvons interpréter ce prix comme le coût de brulage du déchet p_4. Du point de vue comptable le système devra avoir de taux de profit à travers de la génération d'énergie pour compenser le coût de traitement du déchet. Nous utiliserons ce type de système pour développer notre cas d'école du chapitre XIII.

Nous inclurons dans la cascade 5, la génération d'un surplus qui sera approprié par les propriétaires des ressources.

9. **La cascade de type 5 est avec production jointe, réversion d'entropie (*néguentropie*), mais sans la production des polluants**

Dans ce cas la cascade peut être définie comme un flux linéaire qui génère un surplus économique, dans cette catégorie les polluants ne sont pas mesures et les intrants primaires sont mesurés. Le système présente un flux dans le sens contraire à l'entropie. Ce flux sera appelé néguentropie.

Figure 8.3.7 : Cascade avec production jointe, réversion d'entropie, mais sans polluants



Source : L'auteur

Nous donnerons une définition des processus et des transferts entre les processus.

Définitions de processus et de transfert en utilisant la production jointe avec deux intrants, qui génère un surplus économique:

Processus 1 : Un processus écologique qui utilise la forêt comme *fond* dont la fonction, est de reproduire *un capital écologique* (ressources 1 ou R_1) avec un surplus, en utilisant un bien comme le *capital écologique* (ressources 1) comme intrant et un bien ou capital thermodynamique comme l'énergie (ressource 2 ou R_2).

Transfert 1-2 : Le transfert entre le processus 1 et le processus 2 peuvent être caractérisés comme une sortie du *capital écologique* (ressource 1) du processus 1 vers le processus 2, qui l'utilise comme un intrant.

Processus 2 : Un processus économique qui utilise la ville comme *fond* dont la fonction, est de produire un *capital économique* (ressource 3 ou R_3) avec un surplus économique, en utilisant un bien du capital écologique (ressource 1), un bien du capital économique (ressource 3) et une bien ou ca*pitale thermodynamique* comme l'énergie (ressource 2).

Transfert 2-3 : Le transfert entre le processus 2 et le processus 3 peuvent être caractérisés comme une sortie du *capital économique* (ressource 3) du processus 2 vers le processus 3, qui l'utilise comme un intrant.

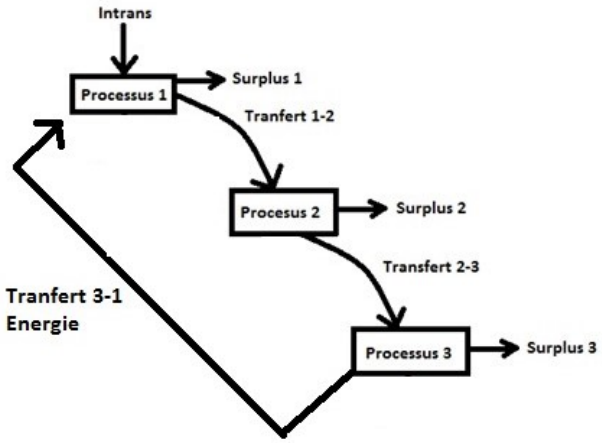
Processus 3 : Un processus économique qui utilise la ville comme *fond*, dont la fonction, est de produire un *capital économique* (ressource 3) et un surplus économique et de 'produire[92]' un bien ou *capital thermodynamique* comme l'énergie (ressource 2, en utilisant un bien du capital *économique* (ressource 3) et une bien ou *capital thermodynamique* comme l'énergie (ressource 2).

Transfert 3-1 du numéraire énergie (Négentropie) : Le transfert entre le processus 2 et le processus 3 être caractérise comme une sortie de la *capitale thermodynamique* comme l'énergie (ressource 2) du processus 3 vers le processus 1, qui l'utilise comme un intrant.

[92] On peut annoncer brièvement l'hypothèse que l'énergie pourrait être produite, stockée et transmis sur une forme électrochimique comme les piles , les batteries ou les condensateurs ou sur une forme biochimique comme l'ATP (Adenosine triphosphate).

Ce parcours peut être présenté graphiquement comme suit :

Figure 8.3.8 : Système 3x3 avec production jointe, réversion d'entropie, mais sans polluants



Source : L'auteur

Le système sera représenté pour les équations linéaires suivantes :

$$
\begin{aligned}
&p_1 + p_2 = p_1 \\
&p_1 + p_2 + p_3 = p_3 \\
&p_2 + 1.5p_3 = p_2 + p_3
\end{aligned}
\tag{8.3.13}
$$

Le système peut être formalisé à travers d'une structuration matricielle décomposable en considérant les intrants A, les sorties B comme suit :

Tableau 8.3.4 : Les deux processus économiques et un processus écologique dans un cadre décomposable

	INPUT			OUTPUT		
	R_1	R_2	R_3	R_1	R_2	R_3
Nature						
Processus 1	a_{11}	a_{12}	0	b_{11}	0	0
Économie						
Processus 2	a_{21}	a_{22}	a_{23}	0	0	b_{23}
valorisation énergetique	0	a_{32}	a_{33}	0	b_{32}	b_{33}

Source : L'auteur

Le système peut être formalisé à travers d'une structuration non carrée de trois équations et quatre ressources dans laquelle, les intrants A, les sorties B, le surplus π et le prix peuvent être formalisés sous forme matricielle comme suit :

$$\begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix} . \begin{bmatrix} p_1 \\ p_2 \\ p_3 \end{bmatrix} .(1+\pi) = \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} & b_{13} \\ b_{21} & b_{22} & b_{23} \\ b_{31} & b_{32} & b_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_1 \\ p_2 \\ p_3 \end{bmatrix} . \quad (8.3.14)$$

En remplaçant les nombres qui accompagnent les prix dans les équations 8.3.13.

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1.5 & 0.5 \end{bmatrix} . \begin{bmatrix} p_1 \\ p_2 \\ p_3 \end{bmatrix} .(1+\pi) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_1 \\ p_2 \\ p_3 \end{bmatrix} . \quad (8.3.15)$$

Nous pouvons ensuite obtenir la valeur propre maxime λ (cf. annexe VIII.B sur la cascade de type V) correspond à 0.92 pour trouver les surplus comme : [(1/0.92)-1]*100 =8.69, dont surplus 1= surplus 2 = π =8.69%. La valeur positive de surplus représenté dans le domaine comptable un gain d'un capital économique donc le système de valeur est capable de générer un profit pour le propriétaire de l'économie donc le fonctionnement ne doit pas être accompagné d'un système des prix administrés.

Les prix peuvent être calculés en utilisant les valeur et les vecteur propres qui permettent de calculer le prix des matrices carrées (cf. annexe VIII.A de production joint).

p_1 =1
p_2 = -0.0772
p_3 = 0.9466

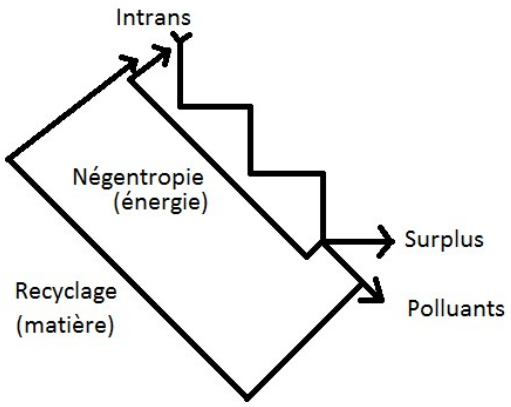
Finalement les résultats montrent les prix relatifs des commodités (détaillé des résultats en annexé VIII.B), 1 tonne de ressource 1 est 0.0772 fois plus coûteuse que la ressource 2, 0.94 fois plus cher que la ressource 3. Nous pouvons remarquer que l'énergie est la ressource le plus coûteuse du système. Nous pouvons annoncer pour ce cas l'hypothèse que la production d'énergie en matière comptable peut financer le fonctionnement des autres processus, cette hypothèse va être discutée dans le chapitre XIII.

Nous nous proposons maintenant d'étudier un cas particulier qui examiné un système de valeur avec des numéraires matériels et énergétiques.

10. La cascade de type 6 est avec production jointe, réversion d'entropie (matière et énergie)

La cascade peut être définie comme un flux linéaire qui génère un surplus, les intrants primaires et les polluants sont mesurés. Ce système présenté un flux dans le sens contraire à l'entropie.

Figure 8.3.9 : Cascade avec production jointe, réversion d'entropie (matière-énergie)



Source : L'auteur

Définitions de processus et de transfert en utilisant la production conjointe avec deux intrants (*numéraires : matière et énergie*), qui génère un surplus économique et un déchet:

Processus 1 : Un processus écologique qui utilise la forêt comme *fond,* dont la fonction, est de reproduire *un capital écologique* (ressource 1 ou R_1) avec un surplus en utilisant un bien comme le *capital écologique* (*ressources* 1) comme intrant et un bien ou *capital thermodynamique* comme l'énergie (ressource 2 ou R_2).

Transfert 1-2 : Le transfert entre le processus 1 et le processus 2 peuvent être caractérisés comme une sortie du *capital écologique* (ressource 1) du processus 1 vers le processus 2, qui l'utilise comme un intrant.

Processus 2 : Un processus économique qui utilise la ville comme *fond*, dont la fonction, est de produire un *capital économique* (ressource 3 ou R_3) avec surplus et un déchet (ressource 4 ou R_4), en utilisant le bien du capital *écologique* (ressource 1), un bien du capital *économique* (ressource 3) et un bien ou *capital thermodynamique* comme l'énergie (ressource 2).

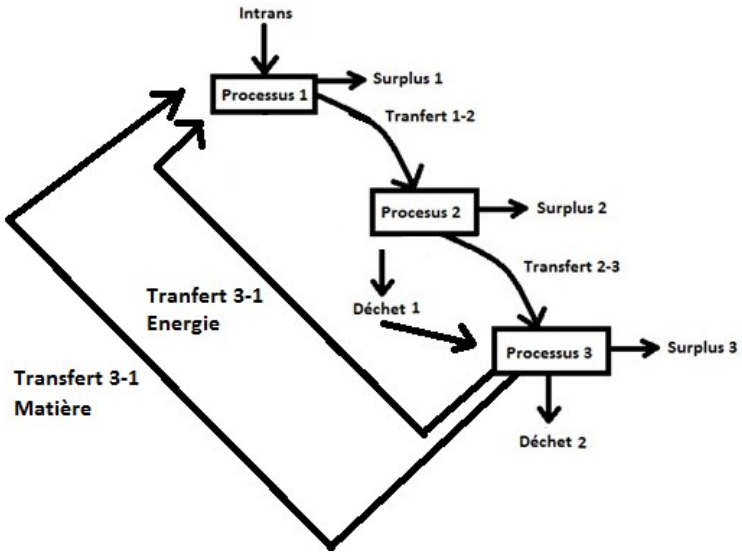
Transfert 2-3 : Le transfert entre le processus 2 et le processus 3 peuvent être caractérisés comme une sortie du *capital économique* (ressource 3) du processus 2 vers le processus 3, qui l'utilise comme un intrant.

Processus 3 : Un processus économique qui utilise la ville comme *fond*, dont la fonction, est de produire un *capital écologique* (ressources 1) et de valoriser un déchet économique (ressource 4) et de 're-utiliser' une bien ou *capital thermodynamique* comme l'énergie (ressource 2), en générant un surplus économique, en utilisant un bien du capital *économique* (ressource 3) et une bien ou *capital thermodynamique* comme l'énergie (ressource 2).

Transfert 3-1 du numéraire énergie (*néguentropie*) : Le transfert entre le processus 3 et le processus 1 peut être caractérisé comme une sortie du *capital thermodynamique* comme l'énergie (ressource 2) du processus 3 vers le processus 1, qui l'utilise comme un intrant.

Transfert 3-1 du numéraire matière : Le transfert entre le processus 2 et le processus 3 peut être caractérise comme un sortie d'une ressource ou *capital écologique* (ressource 1) du processus 3 vers le processus 1.

Figure 8.3.9.A : Système en cascade avec production jointe, réversion d'entropie (matière-énergie)



Source : L'auteur

Le système peut être formalisé pour les équations linéaires suivantes :

$$\begin{aligned} p_1 + p_2 &= p_1 \\ p_1 + p_2 + 0.5p_3 &= p_3 + p_4 \\ 0.1p_2 + p_3 + p_4 &= p_1 + p_2 \end{aligned} \tag{8.3.16}$$

Le système peut être formalisé à travers d'une structuration matricielle décomposable en considérant les intrants A, les sorties B comme suit :

Tableau 8.3.5 : Les deux processus économiques et un processus écologique dans un cadre décomposable

	INPUT				OUTPUT			
	R_1	R_2	R_3	R_4	R_1	R_2	R_3	R_4
Nature								
Processus 1	a_{11}	a_{12}	0	0	b_{11}	0	0	0
Économie								
Processus 2	a_{21}	a_{22}	a_{23}	0	0	0	b_{23}	b_{24}
Traitement déchet	0	a_{32}	a_{33}	a_{34}	b_{31}	b_{32}	0	0

Source : L'auteur

Le système peut être présenté à travers d'un système de valeur sous forme matricielle non carrée comme suit:

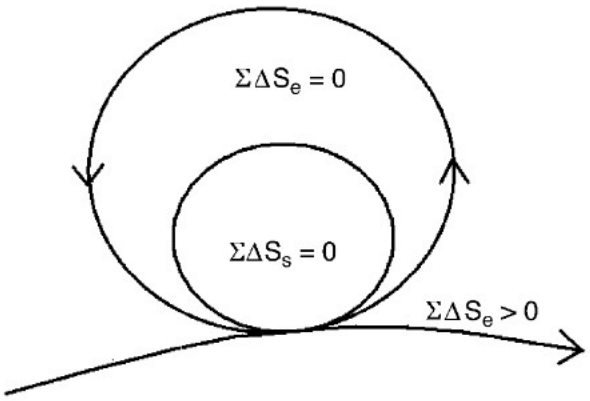
$$\begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{34} \end{bmatrix} . \begin{bmatrix} p_1 \\ p_2 \\ p_3 \\ p_4 \end{bmatrix} . (1+\pi) = \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} & b_{13} & b_{14} \\ b_{21} & b_{22} & b_{23} & b_{24} \\ b_{31} & b_{32} & b_{33} & b_{34} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_1 \\ p_2 \\ p_3 \\ p_4 \end{bmatrix} . \tag{8.3.17}$$

En remplaçant les nombres qui accompagnent le prix dans les équations 8.3.16.

$$\begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0.5 & 0 \\ 0 & 0.1 & 1 & 1 \end{bmatrix} . \begin{bmatrix} p_1 \\ p_2 \\ p_3 \\ p_4 \end{bmatrix} . (1+\pi) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_1 \\ p_2 \\ p_3 \\ p_4 \end{bmatrix} \tag{8.3.18}$$

Dans notre système de valeur la troisième ligne représente la transaction en utilisant deux numéraires, donc la matière et l'énergie à travers d'un processus de recyclage en utilisant une unité d'un bien du capital *économique* (ressource 3), unité d'un déchet économique (ressource 4) et une unité d'un bien ou *capital thermodynamique* comme l'énergie (ressource 2). Les outputs indiquent la matière (ressource 4) et l'énergie (ressource 2) qui seront réutilisées dans le processus 1. L'entropie donnée un cadre irréversible à notre structure de cascade, mais à travers d'un transfert de *néguentropie* vers le processus 1. Dans ce sens, notre système fermera la boucle d'énergie avec $\Delta S=0$.

Figure 8.3.11: Cadre irréversible d'une structure en cascade



Source : Ho, 2005

Les prix seront calculés en utilisant Matlab les méthodes réflexives (patterson, 2014) permettent de calculer le prix et l'efficience des matrices non carrées (cf. annexe VIII.A de production jointe).

$p_1 = 1$
$p_2 = 0.0131$
$p_3 = 0.0966$
$p_4 = 0.9396$

Donc les équations montrent les prix relatifs des commodités (détaillé des résultats en annexé VIII.B), 1 tonne de ressource 1 est 0.0131 fois moins coûteuse que la ressource 2, 0.0966 fois moins cher que la ressource 3 et 0.9396 fois moins cher que la ressource 4.

Le système peut être exploré de façon dynamique à travers des itérations de prix des marchandises, lesquelles montrent qui les prix relatifs sont au debut positives et après negatives (nous pouvons trouver plus des renseignements en annexe VIII.B) cela signifie qu'aucune évolution soutenable du système ne sera possible vers un état d'équilibre. L'analyse de la durabilité de processus dans un état stationnaire versus un état non stationnaire sera abordée dans le chapitre XII.

Indépendamment des considérations précédentes, il existe un certain nombre de raisons qui soutiennent l'intérêt de mise en place d'études sur l'élimination des déchets et le traitement du capital fixe, comme les machines, celles-ci peuvent être considérées en même temps comme des facteurs productifs et comme des produits, elles peuvent contribuer à la production d'autres marchandises dans la période suivante.

Pour la façon de faire de Sraffa sur le service entretien capital fixe, nous pensons qu'il aurait répresenté le capital fixe comme suit :

Tableau 8.3.5 : Representation de capital fixe à la façon de Sraffa

	Service travail	*énergie*	*cap var*	*cap fixe neuf*	*cap fixe no-neuf*	*déchet*						
Ménages	*3.7*	*1.2*	*0*	*0*	*0*	*0*	*3.7*	*0*	*0*	*0*	*0*	*0*
Processus écon A	*0.1*	*0*	*0*	*0*	*0*	*0*	*0*	*0*	*0*	*0*	*0*	*0*
Processus écon B	*2.9*	*1.3*	*0.9*	*0*	*0*	*0*	*0*	*0*	*1.3*	*0*	*0*	*1.1*
Production capital fixe neuf	*0.1*	*1*	*1*	*0*	*0*		*0*	*0*	*0*	*0.8*	*0*	*0*
Incinération avec capital fixe neuf	*0.1*	*0*	*0*	*0.8*	*0*	*0.5*	*0*	*0.5*	*0.3*	*0*	*0.8*	*0*
Incinération avec capital fixe non-neuf	*0.1*	*0*	*0*	*0*	*0.8*	*0.6*	*0*	*0.5*	*0.2*	*0*	*0*	*0*

Nous allons donner un certain nombre de définitions de service travail, énergie, capital variable, capital fixe neuf, capital fixe no-neuf et déchet dans le chapitre XIII.

Mais on peut aussi représenter le capital fixe comme dans le tableau 8.3.6, avec un processus qui produit le service d'entretien de capital fixe qui est vendu au processus de valorisation énérgetique ou d'incinération(et donc représente un coût pour le processus d'incinération) :

Tableau 8.3.6 : Representation du service entretien capital fixe à la façon de Sraffa

	Input							Output						
	Service travail	*énergie*	*cap var*	*cap fixe neuf*	*cap fixe no-neuf*	*service entretien cap fixe*	*déchet*							
Ménages	3.7	1.2	0	0	0	0	0	3.7	0	0	0	0	0	0
Processus écon A	0.1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Processus écon B	2.9	1.3	0.9	0	0	0	0	0	0	1.3	0	0	0	1.1
Production capital fixe neuf	0.1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0.8	0	0	0
Service entretien capital fixe neuf	0.1	0	0	0.8	0	0	0	0	0	0	0	0	0.5	0
Service entretien capital fixe non-neuf	0.1	0	0	0	0.8	0	0	0	0	0	0	0	0.5	0
Incinération	0.1	0	0	0	0	1	1.1	0	1	0.5	0	0	0	0

Dans les deux derniers tableaux, la structure a lieu habituellement un processus qui produit le capital fixe neuf, sinon la quantité de capital fixe disponible va rapidement décroitre jusqu'à zéro, au fur et à mesure que le capital fixe neuf devient non-neuf, puis est mis à la décharge.

Finalement, ce classement des systèmes de valeur a donné un cadre d'analyse pour formaliser notre discussion. L'utilisation et analyse des systèmes de valeur sera approfondie dans la cinquième parti de la thèse.

8.4 Conclusion du Chapitre 8

Ce chapitre cherche à aborder la réflexion aux interdépendances physiques qui existent entre systèmes économique et écologique, liées à différentes structures de valeur. L'analyse en termes de valeur permet de comprendre comment est distribué le surplus entre les acteurs économiques : l'incorporation des ressources écologiques, ou des pollutions, voudra juste dire que le surplus sera échangé directement, entre un plus grand nombre d'acteurs. Cela peut être intéressant pour pouvoir protéger les ressources naturelles (si elles ont un prix, on peut se servir de la rente pour financier leur protection). Mais on peut aussi choisir d'investir pour protéger la nature sans mettre un prix sur elle.

Pour formaliser cette relation cette partie propose un classement des structures qui représentent les parcours cycliques et en cascades de biens dans la biosphère. En outre, la structure distingue trois types de systèmes thermodynamiques : le système isolé, le système fermé et le système ouvert, lequel échange la matière et l'énergie avec l'environnement hors du système. Le classement est ensuite enrichi par les travaux menés pour O'Connor et Schoer en 2009 sur les processus présents dans *les petits, moyens et grands cycles* et également par les relations entre la matière, l'énergie et la thermodynamique proposées par Prigogine (Prigogine, 1967; Morowitz, 1968; Ulanowicz, 1983).

Dans ce contexte, cette thèse propose une typologie de dix structures du système pour formaliser les relations économie-physique. Ces structures numérotées de 1 à 7 ne concernent que la matière, la structure 8 et 9 concernent l'énergie et la structure numéro 10 concerne la matière et l'énergie. En adition à cette typologie, la formalisation du cadre conceptuel du cycle de l'azote a été réalisée sur une structure des cycles et des cascades en utilisant le logiciel ePLANETe avec la galerie des indicateurs ou KIKs (cf. annexe VIII. C sur la structure des cycles et des cascades en ePLANETe).

S'agissant du prix et de la structure de valeur, que signifie ce prix des ressources écologiques ?

Les méthodes réflexives (Patterson, 2014) permettent de calculer le prix et l'efficience des matrices non carrées et la méthode de production jointe le prix et taux de surplus des matrices carrées des ressources écologiques. Nous pouvons obtenir le prix relatif ou relation des échanges entre les biens, mais que signifie ce prix ou cctte relation de valeur ?

Classiquement Sraffa a supposé que le surplus est divisé entre les capitalistes, les travailleurs et les rentiers ici les possesseurs de l'énergie. Mais on se demande comment on va répartir le surplus des processus de l'atmosphère, de lithosphère ? Comment la démarche peut-elle être améliorée pour mieux mesurer les cycles biogéochimiques ?

Nous soutenons dans ce parti la nécessité de répondre à cette question. Ainsi, les réponses à ces questions mènent à la conclusion qu'un système de valeur pourra difficilement être capable de mesurer différents numéraires prenant en compte leurs caractéristiques thermodynamiques et entropiques.

9. LES DEMARCHES D'EVALUATIONS DES CYCLES BIOGEOCHIMIQUES.

LES ENJEUX ECOLOGIQUES ET THERMODYNAMIQUES DES CYCLES biogéochimiques ont été soulignés aux chapitres VII et VIII. En ce sens, l'évaluation et la mesure des cycles fournissent des connaissances sur les types et la localisation des caractéristiques biophysiques. Ils fournissent et caractérisent les cycles biogéochimiques, les flux spatiaux et temporaires des cycles en relation à les bénéficiaires et les impacts de la transformation des terres et de l'eau (Kremen *et al.* 2005). Donc, l'évaluation de la dimension biophysique fournit la connaissance de base pour la sauvegarde les cycles (Heal, 2000).

La mesure de la taille ou l'échelle des caractéristiques biophysiques qui fournissent des services écosystémiques passe par la comptabilisation des flux d'énergie et de matières qui traversent l'économie d'un pays ou d'une région (en tonnes, joules, acres, mètres carrés et en unités non monétaires).

Nous présentons dans ce chapitre le complexité du probleme de gestion et d'étude des flux et la manière d'analyser de façon integrée les actifs et les passifs qui pourraient apporter des réponses dans la représentation et dans les mesures des cycles.

9.1 Quelle représentation des cycles ?

Nous voulons tout d'abord répondre à la question du titre 9.1 en utilisant la figure B du chapitre 1. Ensuite, nous pourrons formuler notre approche pour représenter les pressions exercées par les activités du système socio-économique sur le cycle du carbone. Dans cette démarche, nous définissons le système actif/passif: 1) Le passif écologique comme les déchets ou empreintes écologiques; 2) L'actif écologique comme les services des écosystèmes que nous donnent les activités économiques (Loiret, 2013b).

Ensuite nous pourrons caractériser ce système actif/passif à travers les quatre compartiments dans la figure 9.1.1 comme suit:

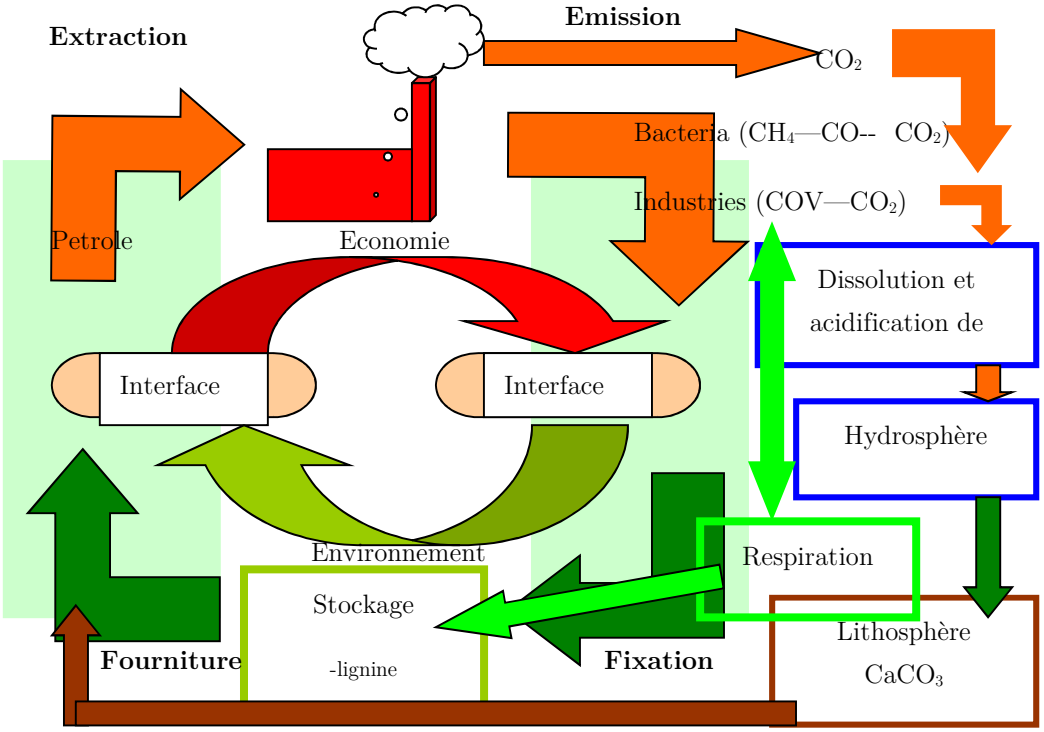
A. *Fourniture* : la source que fournissent les matières premières comme le pétrole, le graphite, le diamant, le marbre et le plastique (polymères).

B. *Extraction* : les matières premières comme les hydrocarbures (pétrole) sont prélevées par les activités économiques lors du processus d'extraction.

C. *Émissions* : l'économie rejette des déchets comme les CH_4 , COV ou le CO_2 dans l'atmosphère, l'hydrosphère, la lithosphère et la biosphère.

D. *Fixation* : ce compartiment doit être capable de stocker le $CaCO_3$ dans la lithosphère, la lignine cellulose et peptidoglicane dans la biosphère ou neutraliser les émissions à travers de la dissolution de H_2CO_3 dans l'hydrosphère.

Figure 9.1.1 : Cycle du carbone : Actif - Passif



Source : L'auteur et Armand, 2011.

Le bilan entre l'actif et le pasif ecologique est l'équilibre entre les échanges (revenus et pertes) de carbone entre les réservoirs où au sein d'une piste cyclique spécifique (par exemple, l'atmosphère - biosphère). Un examen du bilan carbone d'un fonds ou d'un réservoir peut révéler s'ils fonctionnent comme une source ou un dépôt de dioxyde de carbone.

Ce cadre d'analyse s'applique de la même façon pour le cycle de l'azote. En utilisant la figure B et la démarche propose par Loiret (2013b), notre approche peut être adaptée.

Nous pouvons caractériser ce système actif/passif à travers les quatre compartiments :

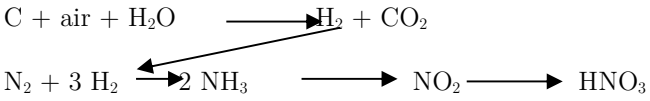
A. *Fourniture* : la source que fournit les matières premières comme l'ammoniaque (NH_3), le nitrate (NO_3^-) et le - KNO_3.

B. *Extraction* : les matières premières comme le NO_2^- et le NO_3^- sont prélevées par la fertilisation agricole à travers le processus d'extraction.

C. *Émissions* : l'économie rejette des émissions comme les NO^-, NO_2, N_2O et le N_2 dans l'atmosphère, les NO_3^- , NO_2^- et NH_4^+ dans l'hydrosphère.

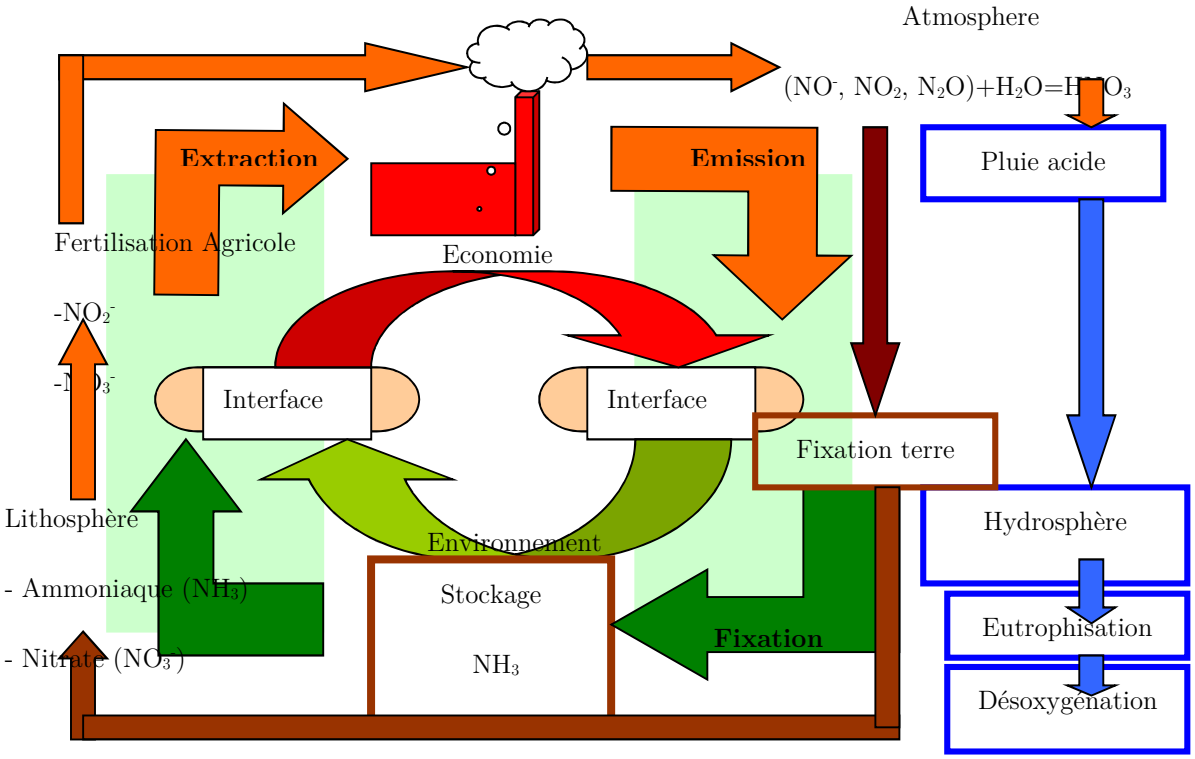
D. *Fixation :* ce compartiment doit être capable de stocker le N_2 dans la biosphère (le procédé *Haber-Bosch)* ou neutraliser les émissions de HNO_3 qui produisent la pluie acide dans l'atmosphère et l'eutrophisation dans l'hydrosphère.

Le procédé *Haber-Bosch* a une importance économique considérable, car il permet la conversion industrielle de l'azote atmosphérique en ammoniaque puis en acide nitrique. Le procédé implique la réaction sous forte pression et à haute température du diazote avec l'hydrogène :



Ensuite le processus peut être caractérisé comme:

Figure 9.1.2 Cycle de l'azote : Actif - Passif



Source : L'auteur et Armand, 2011.

Nous pouvons ensuite appliquer le cadre pour analyser les pressions exercées par les activités du système socio-économique sur le cycle du phosphore (Loiret, 2013b).

Ainsi, nous pouvons caractériser ce système actif/passif à travers les quatre compartiments :

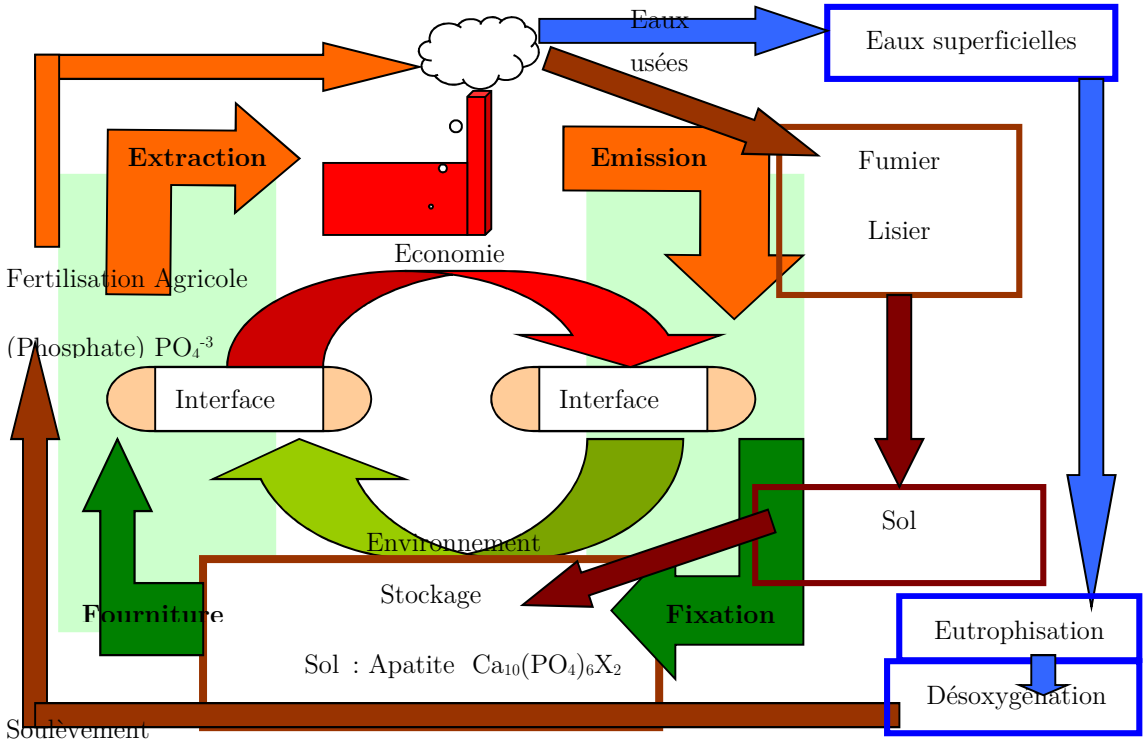
A. *Fourniture* : la source que fournissent des matières premières comme le PO_4^{-3}(Phosphate).

B. *Extraction* : les matières premières comme le phosphate sont prélevées par la fertilisation agricole et les activités industrielles à travers un processus d'extraction.

C. *Émissions* : l'économie rejette des déchets comme les fumiers, lisier, résidus végétaux et déjection animale et eaux usées dans l'hydrosphère et le sol, lesquels produisent l'eutrophisation.

D. *Fixation* : ce compartiment doit être capable de stocker l'apatite $Ca_{10}(PO_4)_6X_2$ dans le sol et les eaux souterraines et l'ATP, l'ADN et l'ARN dans les plantes.

Figure 9.1.3 : Cycle de phosphore : Actif - Passif



Source : L'auteur et Armand, 2011.

Ensuite à travers cette notion d'Actif/Passif, notre approche peut être utilisée pour analyser les pressions exercées par les activités du système socio-économique sur le cycle du soufre (Loiret, 2013b).

Comme dans le cas du phosphore, le système actif/passif peut être caractérisé à travers les quatre compartiments :

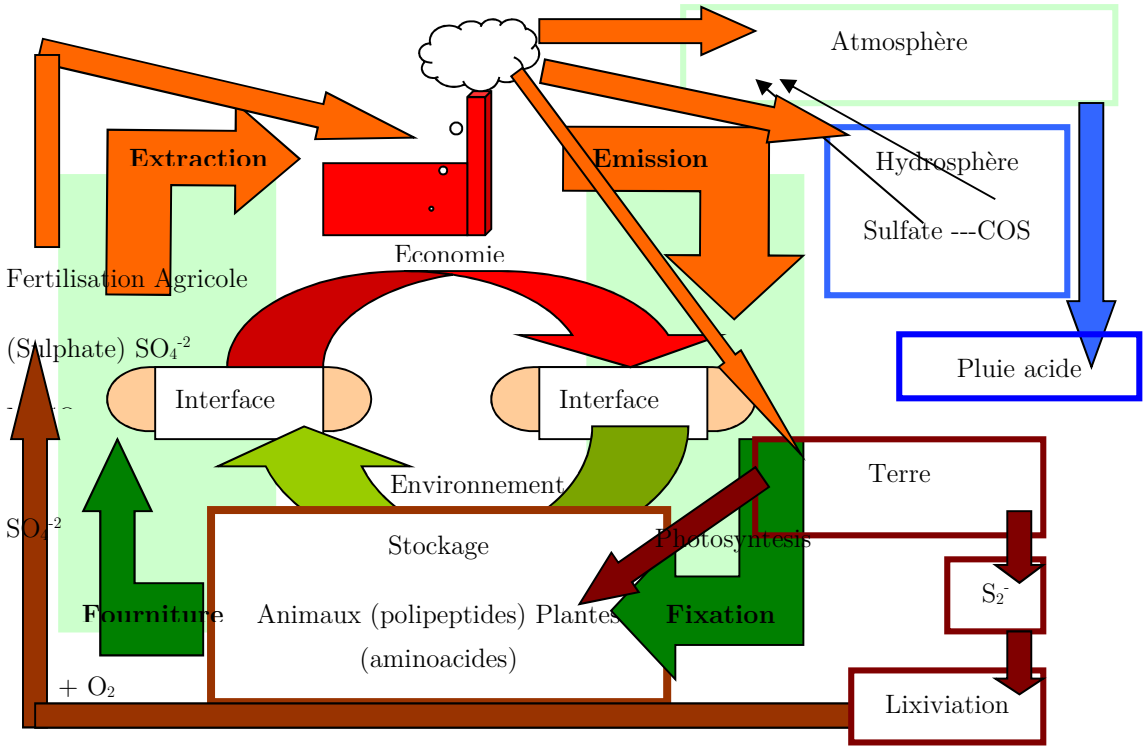
A. *Fourniture* : la source que fournissent des matières premières comme le SO_4^{-2} (Sulfate) et le $MgSO_4$.

B. *Extraction* : les matières premières comme le sulfate sont prélevées par la fertilisation agricole et les actives industrielles à travers un processus d'extraction.

C. *Émissions* : l'économie rejette des déchets comme les COS, les DMS et le H_2S dans l'hydrosphère et le SO_2 , le SO et le SO_3 dans l'atmosphère qui produisent la pluie acide (H_2SO_4).

D. Fixation : ce compartiment doit être capable de stocker les polypeptides, les aminoacides, la pyrite (FeS_2), le SO_4 et le S_2^-.

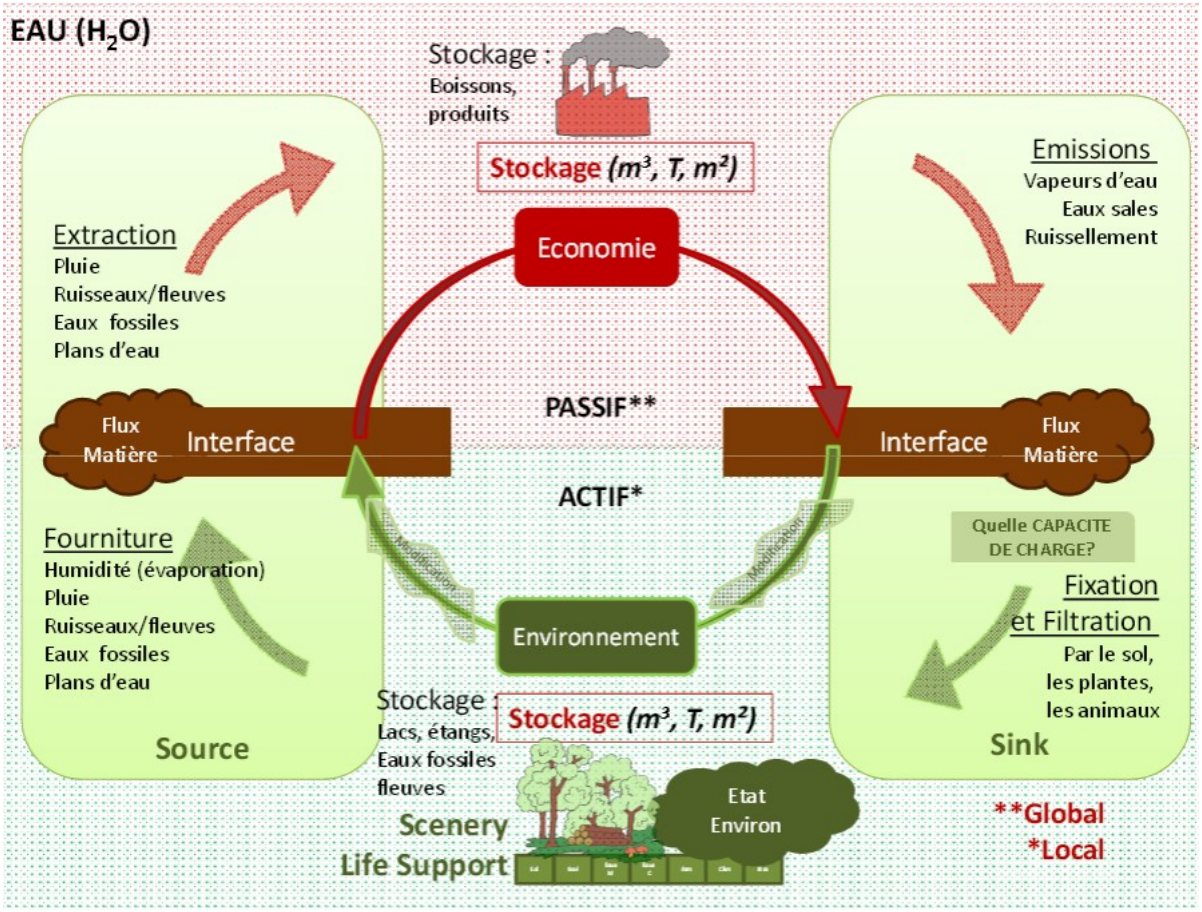
Figure 9.1.4 Cycle du soufre : Actif - Passif



Source : L'auteur et Armand, 2011.

Finalement, nous pouvons analyser la contribution de la vapeur d'eau dans le grand cycle que constitue l'évaporation des eaux de mer, des lacs et des rivières, la transpiration des zones humides, l'infiltration vers les nappes, et les précipitations comme la pluie et la neige. Il faut considérer que la vapeur d'eau dans la stratosphère est un gaz à effet de serre très important, (IPCC, 2013) ce parcours sera montré dans la figure 9.1.5.

Figure 9.1.5 Cycle d'eau : Actif - Passif



Source : Armand, 2011.

En utilisant la figure B du chapitre I, notre approche peut être adapté pour analyser les pressions exercées par les activités du système socio-économique sur le capital naturel (figure 9.1.5). Dans cette démarche et comme dans les autres cycles, les déchets ou empreintes écologiques représentent le passif écologique et les services des écosystèmes représentent les activités économiques ou actives écologiques (Loiret, 2013b).

Le système actif/passif peut être représenté par les quatre compartiments :

A. *Fourniture* : la source que fournissent des matières premières comme l'humidité (évaporation), la pluie, les ruisseaux, les eaux fossiles et les plans d'eau.

B. *Extraction* : les matières premières comme la pluie, les ruisseaux, les eaux fossiles et les plans d'eau sont prélevés par la fertilisation agricole et les activés industrielles au travers le processus d'extraction.

C. *Émissions* : l'économie rejette des déchets comme les eaux sales et les ruissellements dans l'hydrosphère et la vapeur d'eau dans l'atmosphère.

D. *Fixation et infiltration* : ce compartiment est capable de stocker l'eau dans le sol, les plantes et les animaux.

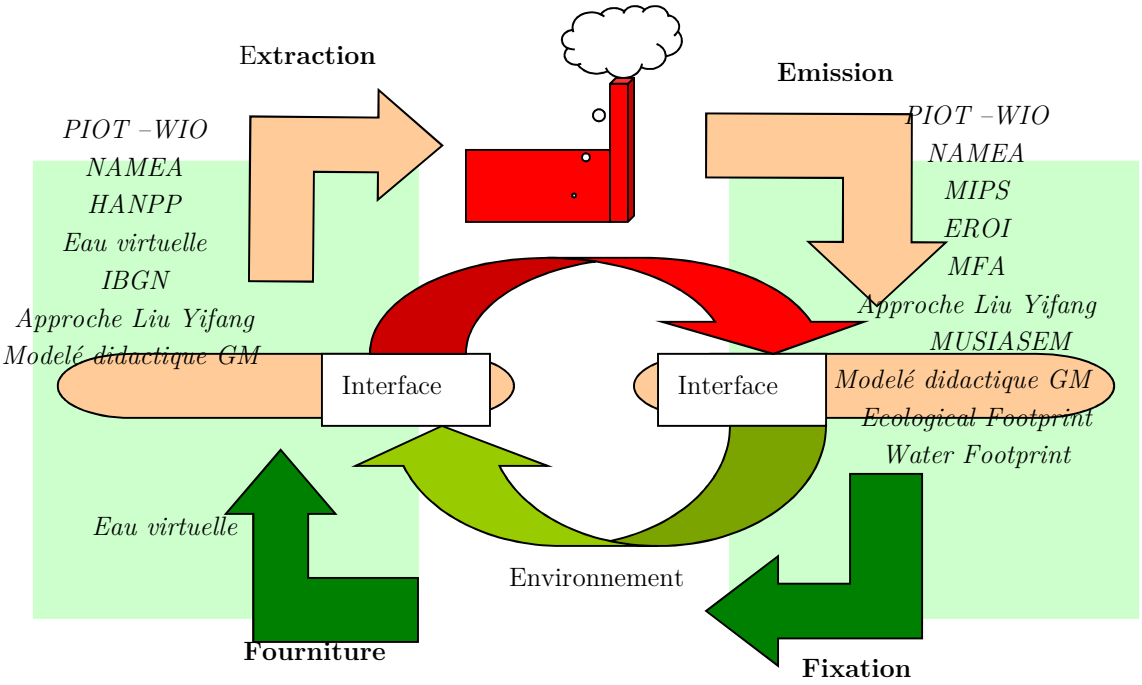
Après la représentation du grand cycle de l'eau en quatre compartiments, le petit cycle domestique de l'eau inclut le prélèvement, le traitement, l'utilisation, l'assainissement et la restitution dans la ville. Seulement 2,8 % de l'eau est doux, dont moins de 3/4 se trouve sous forme de glace, soit 2,1 % de l'eau de la terre selon les agences de l'eau (Rollin, 2013). Les prélèvements d'eau en France métropolitaine sont estimés à 33,1 milliards de m^3. Plus de la moitié de ce volume est consacrée au refroidissement des centrales thermiques classiques et nucléaires (55%) (Ifen, 2005).

Enfin, il existe des modèles comme le modèle *input-output*, pour exprimer la production et la consommation d'eau (Schoer, 2000) et d'autres qui modélisent les inefficacités de l'exploitation privée des ressources comme l'eau (Martin, 2011) ou la gestion urbaine des eaux pluviales et leur valorisation (Chocat, 2008). Les eaux usées domestiques sont riches en matière organique, en phosphate et en azote. Dans un contexte où l'agriculture est amenée à consommer de plus en plus d'intrants (Condom, 2014), des innovations majeures visent à optimiser les filières de réutilisation des eaux usées, comme OxyblueTM, une solution développée par Degrémont. Cette solution élimine les pollutions non biodégradables ou persistantes des eaux résiduaires industrielles (Suez Environment, 2014). Une autre solution, le PHA bioplastic pour le traitement de l'eau usée est proposé par la Fondation Ellen MacArthur (Ellen MacArthur Foundation, 2013) qui soutient l'économie circulaire.

9.2 Présentation des outils d'évaluation des cycles

Bien que le concept d'analyse de circularité d'un parcours, réside dans le fait qu'il se focalise surtout sur les paramètres de flux entre les intrants et les sorties du système, il ne se focalise pas sur la propriété de bouclage du cycle qui peut être présente ou non. L'objet de la présente section est donc de présenter les outils d'évaluation des cycles et de lancer la discussion sur l'existence ou non de cette propriété dans le système de mesure de chaque outil. Dans un deuxième temps, nous utliserons l'approche qui a été explorée dans le chapitre I et qui peut être reformulée en utilisant la figure B du premier chapitre pour : 1) Réaliser une présentation systématique des outils ; 2) Analyser les pressions exercées par les activités du système socio-économique sur le capital naturel. Dans cette démarche, les déchets ou empreintes écologiques peuvent être définis comme le passif, et des activités comme l'agriculture, pêcheries, forêts gérées, etc., comme l'actif écologique (Loiret, 2013b).

Figure 9.2.1 les méthodologies en fonction de leur objectif : Actif - Passif



Source. L'auteur

Ce système actif/passif peut être caractérisé par quatre compartiments :

A. *Fourniture* : la source qui fournit les matières premières ou services écosystémiques.

B. *Extraction* : les matières premières ou services écosystémiques qui sont prélevés par les activités économiques à travers un processus d'extraction qui peut être mesuré en utilisant PIOT-WIO, NAMEA, Hanpp, Eau virtuelle, IBGN.

C. *Émissions* : les émissions et déchets comme les GES, le CH_4 ou le CO_2 dans l'atmosphère, l'hydrosphère, la lithosphère et la biosphère rejetées par l'économie. Ces émissions peuvent être mesurées par PIOT-WIO, NAMEA, MIPS, EROI, MFA, Approche Liu Yifang, MUSIASEM, Modèle didactique GM, Ecological Footprint et Water Footprint.

D. *Fixation* : ce compartiment doit être capable de stocker ou neutraliser les émissions et déchets de l'économie, par exemple dans la mer.

Dans les prochaines sous-parties de ce chapitre, les types d'indicateurs biophysiques seront présentés lors un bref état des lieux résumé dans le tableaux 9.2.1 et 9.2.2.

Tableau 9.2.1 : Sommaire des modèles d'évaluation des cycles partie 1.

Modèles	MFA	PIOT	NAMEA	WIO	Ecological footprint	HANPP	MIPS	Eau virtuelle	IBGN	EROI	CL	Didactique	MuSIASEM
Unités	Physiques	Physiques	Physiques et monétaires	Physiques et monétaires	Physiques	Physiques	Physiques	Physiques	Physiques	Physiques	Physiques et monétaires	Physiques	Physiques
Description générale	Modèle global des flux physiques entrant ou sortant de l'économie nationale	Modèle détaillé des flux physiques, selon les secteurs économiques (structure entrées-sorties)	Compte hybride : flux physiques par secteur + tableau entrées-sorties monétaire	Modèle entrées-sorties hybride à deux niveaux : 1. Comptes nationaux et environnementaux 2. ACV	Indicateur qui montre la pression qu'exerce l'homme sur la nature	Cet indicateur évalue les ressources qui restent disponibles après consommation humaine	Indicateur qui mesure l'intensité matérielle pour intensité de service	Mesure l'eau nécessaire à la production d'un bien.	Indice biologique global normalisé	Taux de retour énergétique	Indicateurs de bouclage de flux	Basée sur la transformation et la consommation de ressources ou commodités	Analyse Multi-Echelle intègre des métabolismes de la société et des écosystèmes
Concepts généraux	Basé sur le principe d'équilibre des masses Économie nationale traitée comme une « boîte noire »	Cas spécifiques d'un tableau des ressources et des emplois Représentation des flux physiques entre les secteurs (ouverture de « la boîte noire »)	Représentation des flux physiques par secteur dans les comptes, liés aux flux monétaires entre les secteurs	Modèle hybride ACV Plusieurs combinaisons possibles traitements matières résiduelles Analyse de la production nette de matières résiduelles	Représentation des flux physiques de sortie des secteurs Trois groupes: Top-down, Botton-up et mixte.	Indicateur de mesure du métabolisme sociale (pression locale)	Montré qui les inputs (ressources naturelles), devient des outputs (émissions ou déchets).	Reconnaître l'eau comme facteur de production.	Méthode qui utilisée en hydrobiologie afin de déterminer la qualité biologique d'un cours d'eau	Bilan entre l'énergie récupérée et l'énergie consommée pour chaque produit	Modèle entrées-sorties hybride	Utilise l'indicateur Ecotime , qui mesure en fonction du temps la valeur relative du cycle biogéochimique.	Cette une tentative de représenter un métabolisme à travers d'un numéraire énergétique en Giga Joules(ERoEI)
Possibilités d'applications	Indicateurs agrégés. Ex. : DPO Utilisé davantage pour analyser le côté des intrants à l'aide des indicateurs DMI et DMC	Indicateurs d'éco-efficience (quantité de résidus/quantité de produits ou quantité de résidus/valeur des produits) Analyse entrées-sorties : génération indirecte de matières Analyse de décomposition structurelle			Méthode Bilan Carbone® proposée pour l'ADEME Méthode GFN (Global Footprint Network Airparif	L'utilisation des terres et l'information sur la couverture du sol. Données sur les flux de matières et d'énergie.	Calcul de l'intensité matérielle, mesure l'éco-efficience.	Etablir le rapport entre l'usage de l'eau comme facteur de production et la consommation d'un individu ou d'une nation	Identification des Macroinvertébrés d'eau douce	Energies fossiles conventionnelles ou non conventionnelles	Récupération et de stockage de déchet	Transformation et la consommation de ressources de Cycle biogéochimique.	Métabolismes de la société et des écosystèmes

Source : ADEME, 2007, 2010 ; Couvet *et al*, 2010 ; Giampietro *et al* , 1997, 2000a, 2000b, 2003; ISQ, 2011 ; OCDE, 2010 ; Smith, 2014 ; Van den Bergh, 1999 ; Yifang, 2007

Tableau 9.2.2: Sommaire des modèles d'évaluation des cycles partie 2.

Modèles	MFA	PIOT	NAMEA	WIO	Ecological footprint	HANPP	MIPS	Eau virtuelle	IBGN	EROI	CL	Didactique	MuSIASEM
Principaux avantages	Standardisation avec le guide d'Eurostat (2001) et les travaux de l'OCDE (2008a;b;c;d) Simplicité du modèle	Analyse des flux physiques intersectoriels	Traitement facilité de thèmes précis Principaux avantages Simplicité du modèle Compromis entre degré de détails et disponibilité des données	Analyse des flux physiques intersectoriels Prise en compte du dynamisme de traitement des résidus par l'intégration de modèles de processus d'ingénierie	Standardisation des données Méthodologie de désagrégation de comptes environnementaux déjà existants (REAP)	Cet indicateur pourrait être un indicateur de résilience des écosystèmes	Un indicateur simple de l'intensité de matière d'un service	Mesure la fraction invisible de l'eau ignorée dans la littérature	Méthode standardisée	Prend en compte l'énergie nécessaire pour extraire, transformer et pour transporter.	Analyse des flux physiques intersectoriels	Analyse des flux physiques intersectoriels	Permet de vérifier la performance du métabolisme des systèmes socio-économiques par rapport à l'existence de contraintes écologiques
Principaux désavantages	Absence d'information sur l'origine des matières résiduelles Pas de liens avec les comptes monétaires Très grand niveau d'agrégation	Non standardisé Compilation d'un PIOT complet demande des ressources importantes Difficulté de conversion des unités monétaires en unités physiques	Pas d'indicateur agrégé de la pression totale de l'économie sur l'environnement Ne prend pas en compte les flux physiques indirects et inutilisés Ne prend pas en compte le principe d'équilibre des masses	Non standardisé Difficultés techniques dues à la complexité du modèle	Agrégation, la pondération et l'importance politique. Problèmes avec le facteur de conversion dans la consommation-physique des terres.	Difficultés techniques dues à la comptabilité de l'énergie	Traite toutes les matières de la même manière. Elle ne rende pas en compte la rareté des matières.	Difficulté de conversion des unités monétaires en unités physiques	Pas de liens avec les comptes monétaires	Difficulté de conversion des unités monétaires en unités physiques	Pas d'indicateur agrégé de la pression totale de l'économie sur l'environnement	Compilation d'un PIOT complet demande des ressources importantes	Difficultés techniques dues à la complexité du modèle
Applicabilité	+	-	+	--	+	+	++	-	+	++	+	+	-
Comparabilité	++	-	+	--	-	+	+	-	-	+	-	-	+
Désagrégation	--	+	+	++	--	+	--	-	-	-	-	+	++
Indicateurs	-	++	++	++	+	++	++	++	++	+	+++	++	++
Compatibilité	+	+	++	-	++	-	+	-	-	-	-	-	-
Efficience	+	-	++	-	++	+	++	-	+	+	++	+	-

Source : ADEME, 2007, 2010 ; Couvet *et al*, 2010 ; Giampietro *et al* , 1997, 2000a, 2000b, 2003; ISQ, 2011 ; OCDE, 2010 ; Smith, 2014 ; Van den Bergh, 1999 ; Yifang, 2007

9.2.1. **Ecological footprint**

L'empreinte écologique[93] est un indicateur qui fait état de la pression qu'exerce l'homme sur la nature. Les méthodes proposées par la littérature peuvent être classées en trois groupes : *Top-down, Bottom-up* et mixte. Plusieurs outils dépendent du type de groupe (figure 9.2.1.1)

Figure 9.2.1.1 : trois groupes d'empreinte écologique

Source : L'auteur

Les TOP-DOWN

Tout d'abord, la méthode de mesure GFN (Global Footprint Network) se base sur des données internationales publiées par l'Organisation des Nations Unies pour l'Alimentation et l'Agriculture, l'Agence Internationale de l'Énergie, le département des statistiques des Nations Unies et le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat. [94]

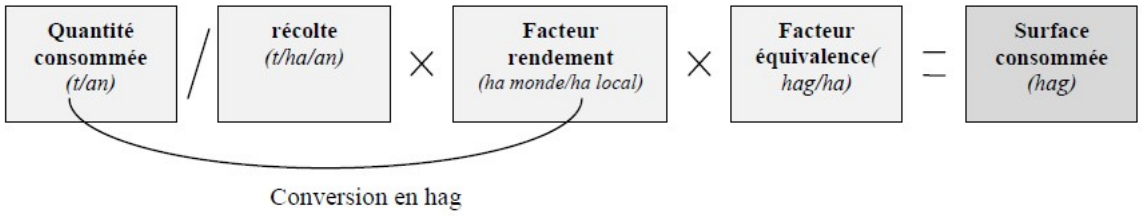
Elle a été développé par Mathis Wackernagel et William Rees à l'Université de Colombie-Britannique en 1996. Plus récemment, le sujet a été utilisé pour trouver la relation entre le développement économique et l'impact sur l'environnement (Moran *et al.* 2008). Le calcul de l'empreinte écologique est basé sur la traduction des consommations en surfaces (hectares globaux) de terre et d'eau biologiquement productives, utilisées pour produire les ressources consommées et pour assimiler les déchets générés avec les technologies actuelles.

L'empreinte écologique peut être calculée comme : la surface consommée à la récolte par un facteur de rendement et d'équivalence (Figure 9.2.1.2) . Un exemple de cet indicateur pour la métropole parisienne a été proposé par Audrain *et al.* (2011).

[93] L'empreinte écologique peut être traduite en anglais comme Ecological footprint

[94] Pour développement détaillé de la méthodologie de Global Footprint Network, consulter le site: *http://www.footprintnetwork.org/fr/index.php/GFN/page/methodology/* (site consulté le 20 septembre 2016).

Figure 9.2.1.2. Méthode de Calcul de l'empreinte écologique



Source : Audrain *et al.* 2012

Un effort considérable en matière de standardisation des données a été fait. Par contre, on peut trouver des critiques sur l'agrégation, la pondération et l'importance politique de l'empreinte écologique (Van den Bergh, 1999). Le facteur de conversion de la consommation physique des terres pose également problème.

Le deuxième outil de l'empreinte écologique est la méthode REAP (*Ressources & Energy Analysis Program*) qui est une méthodologie de *désagrégation* de comptes environnementaux *déjà* existants, qui permet d'obtenir ces mêmes comptes (Loiret, 2009). Elle a été mis au point au Royaume-Uni (Wiedmann *et al.*, 2005, 2006) par le *Stockholm Environment Institute* (SEI).

Finalement, le dernier outil *top-down* est la méthode *Garry Mac Donald* qui permet de calculer une empreinte écologique des ménages.

Le BOTTOM-UP

Dans le second groupe de la figure 9.2.1.1 nous trouverons les méthodes bottom-up. Dans ce groupe se trouve la méthode *Bilan Carbone®* proposée par l'ADEME (L'Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie) qui permet à une entreprise d'évaluer son impact global en matière d'émissions de gaz à effet de serre. Il n'est pas envisageable de mesurer directement les émissions de gaz à effet de serre résultant d'une action donnée, car la plupart des émissions sont des émissions induites (par exemple pour l'emploi final des produits). La méthode *Bilan Carbone®* a été mise au point pour estimer ces émissions, grâce à un mélange de calculs à partir des facteurs d'émission de coefficients (exprimés en équivalent carbone) qui permettent de convertir les données observables dans l'entreprise en émissions de gaz à effet de serre (ADEME, 2007a, 2010) voir figure 9.2.1.3

Tableau 9.2.1.3 Facteurs d'émission des combustibles liquides, combustion seule.

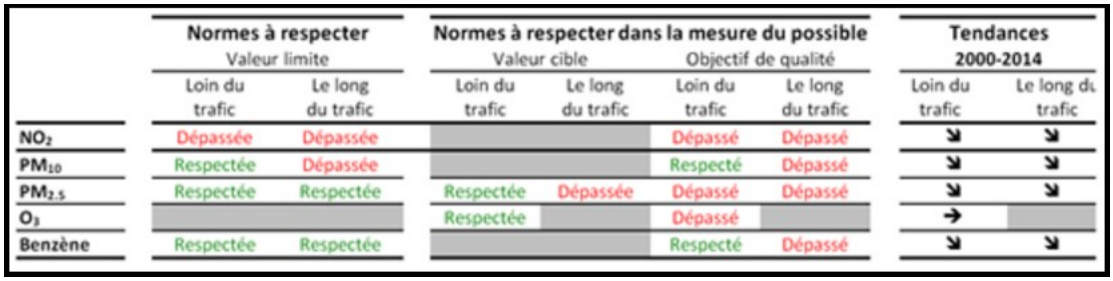
Source d'énergie	kg équivalent carbone par tonne	kg équivalent carbone par kWh	kg équivalent carbone par tep PCI	kg équivalent carbone par litre
Gaz de Pétrole Liquéfié - GPL	803	0,063	733	0,432
Supercarburant (ARS, SP95, SP98)[15]	876	0,072	836	0,661
Gazole	859	0,074	859	0,726
Fuel domestique	859	0,074	859	0,726
Fuel lourd	851	0,077	893	0,851
Pétrole brut	836	0,072	836	0,726
Carburéacteur[16]	852	0,073	848	0,682

Source : ADEME, 2010

MIXTE

La troisième groupe de la figure 9.2.1.1 présente les outils mixtes comme la méthode proposée par Airparif qui réalise et maintient à jour l'inventaire des émissions de polluants en Île-de-France. Cinq polluants posent toujours problème à différents degrés dans la région capitale car ces polluants sont coupables des pics de pollution en Île-de-France (figure 9.2.1.3) :

Figure 9.2.1.3 Situation des émissions de l'année 2014



	Normes à respecter (Valeur limite)		Normes à respecter dans la mesure du possible (Valeur cible)		(Objectif de qualité)		Tendances 2000-2014	
	Loin du trafic	Le long du trafic	Loin du trafic	Le long du trafic	Loin du trafic	Le long du trafic	Loin du trafic	Le long du trafic
NO_2	Dépassée	Dépassée			Dépassé	Dépassé	↘	↘
PM_{10}	Respectée	Dépassée			Respecté	Dépassé	↘	↘
$PM_{2.5}$	Respectée	Respectée	Respectée	Dépassée	Dépassé	Dépassé	↘	↘
O_3			Respectée		Dépassé		→	
Benzène	Respectée	Respectée			Respecté	Dépassé	↘	↘

Source : Airparif[95]

Finalement, nous avons remarqués que dans les trois groupes *Top-down, Bottom-up* et mixte, il y n'avait aucune méthode mesurant directement et explicitement un bouclage de flux parce que toutes considèrent le flux en cascade irréversible de polluants vers la biosphère.

9.2.2. **Human Appropriation of Net Primary Production (HANPP)**

En 2004 un groupe des chercheurs[96] a développé des indicateurs de durabilité biophysiques pour observer l'État de l'environnement, les fonctions, et d'autres impacts humaines qui peuvent entraîner des conséquences sur certains aspects de la durabilité. L'un de ces indicateurs est le HANPP (appropriation humaine de la production primaire nette). Celui-ci évalue les ressources restant disponibles pour l'ensemble de la biodiversité après la consommation humaine, les ressources pourraient s'appuyer sur les analyses cycle de vie (Couvet *et al.* 2010).

Plus précisement, cet indicateur est défini comme l'appropriation par l'homme de produits primaires de la photosynthèse nette exprimée en termes de pourcentage en utilisant différents types des données comme :

[95] Pour développement détaillé sur la méthode d'inventaire des émissions des polluants en Ile-de-France, consulter le site: *http://www.airparif.asso.fr/etat-air/bilan-annuel* (site consulté le 22 septembre 2016).

[96] Groupe de chercheur intègre, notamment pour la NASA, la université de Maryland, WWF, l'université de Stanford, le centre par la recherche de l'atmosphère et l'Université de Bowie, consulter le site: *sedoc.ciesin.columbia.eu* (site consulté le 22 septembre 2016).

Tableau 9.2.2.1 : Données pour HANPP

	Spatially explicit data (rastered information)	Census data (administrative boundaries defined by socioeconomic systems)
Land use and land cover information	Remote sensing (e.g. Joint Research Center, 2002; FAO, 1999; Friedl et al., 2002; Hansen et al., 2003) Land use and land cover assessments (e.g. Erb et al., 2007; Ramankutty and Foley, 1998; Sanderson et al., 2002)	Census statistics/surveys (e.g. FAO, 2004; Eurostat, 2002) Cadastre surveys Forest inventories (e.g. FAO, 2001; UN, 2000)
Data on material and energy flows (in socioeconomic and ecological systems)	Dynamic vegetation models (e.g. results of the LPJ-DGVM, Sitch et al., 2003b)	Harvest statistics/surveys (e.g. FAO, 2004; Krausmann et al., 2008) Forest inventories (e.g. UN, 2000)

Source : Erb, 2009

Nous nous apercevons que le HANPP évalue les ressources qui restent disponibles après consommation humaine. Ainsi, il mesure la variation nette entre production et consommation, cependant il ne mesure pas la quantité des sorties que retournent vers la biosphère via le processus de recyclage. En outre, il n'est pas adapté a nos besoins de mesuse d'un bouclage de flux.

9.2.3. **Material Input per Unit Service (MIPS)**

Le MIPS est un outil qui mesure de l'intensité matérielle par l'intensité de service (Schimdt-Bleek, 1994 ; Hakee, 2001). Cette méthode mesure l'éco-efficience et a été développée par Schmidt-Bleek de l'institut Wuppertal, un institut qui travaille sur le changement climatique, l'environnement et l'énergie. Elle couvre tous les inputs du cycle de vie du produit ou du service comme l'extraction, la fabrication, le transport, l'utilisation, la maintenance et la fin de la vie (OCDE, 2010).

Le concept du MIPS montré que chaque *input* matériel, comme les ressources naturelles, se transforme en *outputs*, comme des émissions ou des déchets.

Pour calculer le MIPS d'un produit, on suit les étapes ci-dessous (Haake 2001 ; Cohen, 2011 ; Liedtke *et al* 2014) :

- Définition du bien ou service et l'unité de mesure ou base 'S' dans MIPS.
- Analyser le cycle de vie du produit.
- Représenter les inputs et les outputs à travers d'un schéma du processus.
- Calcul de l'intensité matérielle totale 'MI' utilise pour fabriquer un produit des deux étapes : berceau de produit[97] et berceau à la tombe[98].
- Comparaison de 'MI' au 'S'.

Pour trouver des exemples sur l'esquisse du processus de production et l'inventaire du 'MI' dans 'MIPS' cf. Haake (2001) et Liedtke *et al* (2014).

Comme nous avons vu, MIPS est un indicateur qui mesure l'intensité matérielle par intensité de service destiné essentiellement aux consommations de matières premières et d'énergie (intrants). Aussi, la méthode permet de comparer la consommation de matières, mais ne mesure pas la quantité des sorties qui retournent vers le système. Dès lors, il n'était pas adapté a nos besoins de mesuser la boucle caractéristique des parcours cycliques.

[97] Le berceau de produit peut être traduit en anglais comme Cradle to produit
[98] Le berceau à la tombe peut être traduit en anglais comme Cradle to the grave

9.2.4. **Le concept d'eau virtuelle**

L'importance du concept d'eau virtuelle vient d'abord de sa capacité à reconnaître l'eau comme facteur de production. Il mesure l'eau nécessaire à la production d'un bien.

Grâce a ce concept il est possible d'établir le rapport entre l'usage de l'eau comme facteur de production et la consommation d'un individu ou d'une nation. Par exemple, un être humain a besoin de boire de 2 à 5 litres d'eau par jour, nécessite de 25 à 100 litres pour ses usages domestiques, et a besoin de 1 000 à 6 000 litres par jour pour se nourrir.

La fraction invisible de l'eau est celle qu'on retrouve dans les aliments et est 37 à 57 fois plus grande que la fraction visible (Turton, 2000). Or, la fraction invisible est largement ignorée dans la littérature (Turton, 2000). C'est pourquoi le concept d'eau virtuelle est très important car il permet de mettre en évidence le problème de la rareté de l'eau dans les pays d'Afrique (Entholzner *et al.* 2016).

Finalement, le concept d'eau virtuel peut être utilisé pour évaluer l'empreinte environnementale d'un produit. Certe, il propose une mesure des sorties d'eau, mais ne mesure pas la quantité des intrants qui retournent vers le système sous la forme d'eau propre. En conclusion, il n'est pas adapté a nos besoins de mésuser les sorties qui retournent comme des intrants dans le cycle de l'eau.

9.2.5. **L'indice Biologique Global Normalise (IBGN)**

Dans la famille des indices biotiques ou indicateurs biologiques, l'indice biologique global normalisé (ou IBGN) est une méthode standardisée utilisée par l'hydrobiologie afin de déterminer la qualité biologique d'un cours d'eau.

La méthode se base sur l'identification des différents macroinvertébrés d'eau douce présents sur un site pour calculer une note.

IBGN= N° de groupe faunistique indicateur+(N° de classe de variété -1) (Archaimbault, 2010)

Cette note, d'une valeur de 0 à 20, est basée sur la présence ou l'absence de certains taxons bio-indicateurs pollu-sensibles aussi que sur la richesse faunistique globale du site.

En résumé, la méthode normalisée d'évaluation mesure la qualité physico-chimique de l'eau, ainsi que la présence, l'absence ou l'abondance de certaines espèces. Ce méthode est utilisée comme outil de mesure de la condition de dégradation environnementale (Hafiane *et al.* 2013). Elle permet donc, d'indiquer implicitement la qualité d'eau dans le parcours du grand cycle de l'eau, mais n'indique pas si le parcours est cyclique ou en cascade.

9.2.6. **Energy Return on Investment (EROI)**

Comme nous l'avons déjà mentionné au chapitre I, les hommes ne sont pas capables de produire de l'énergie. Ils sont capables de la capter, de la transformer et de la transporter. Chacune de ces opérations elles-mêmes coûtent de l'énergie. La question énergétique est donc en quelque sorte un ratio.

L'EROI ou EROEI, (en anglais *Energy Return On Energy Investment*[99]). Définit le taux de retour énergétique c'est-à-dire le rapport entre l'énergie extraite d'une ressource donnée et l'énergie qu'il convient de mobiliser pour extraire cette ressource. Il existe un EROI élargi qui prend en compte non seulement l'énergie nécessaire pour extraire, mais aussi l'énergie nécessaire pour transformer et pour transporter l'énergie. Plus l'EROI est grand, plus l'efficacité de production est importante.

Nous observons actuellement que pour le solaire, l'efficacité tend à augmenter (Raugei *et al.* 2017). À moyen terme, il devrait être possible d'atteindre le rapport 30/1. Cette situation est à l'inverse des énergies fossiles conventionnelles ou non conventionnelles dont l'EROI devrait inexorablement diminuer. L'exploitation des sables bitumineux nous donne un bon exemple d'efficacité médiocre de production énergétique.

Le calcule d'EROI peut être exprimé comme suit :

EROI = (Énergie récupérée) / (Énergie consommée pour la production)

À partir de cette relation, nous pouvons caractériser trois indicateurs dans la figure 9.2.6.1

Tableau 9.2.6.1 : Représentation des indicateurs d'EROI

Indicateur	*Numéraire*	*Description*
ERoEI Point of Use (pou)	Giga Joules/Giga Joules	Tiens compte de l'énergie requise pour obtenir et approvisionner l'énergie.
ERoEI Extended (ext)	Giga Joules/Giga Joules	Tiens compte de l'énergie requise pour obtenir, approvisionner et utiliser l'énergie.
ERoEI Standard(st)	Giga Joules/Giga Joules	Tiens compte de l'énergie requise pour obtenir l'énergie.

Source : L'auteur

Dans cette méthode on peut trouver le bilan entre l'énergie récupérée et l'énergie consommée pour chaque produit. Le rapport de Trévard en 2013 précise : " *Charles Hall explique qu'avant le choc pétrolier de 1973, l'ERoEI du pétrole importé par les États-Unis était d'environ 25 :1 (1 baril investi pour 25 barils récupérés). Au moment du choc, la hausse du prix a fait descendre l'ERoEI à 9 :1, puis lors du second choc de 1979, il serait descendu jusqu'à 3:1.* " (Trévard, 2013). Ces relations dépendent des éléments technico-économiques que l'on peut rencontrer dans les bilans des entreprises du secteur.

EROI est intéressant pour des comparaisons énergétiques (Arnsperger *et al.* 2016), mais reste encore modeste comme indicateur explicite de circularité car il se limite à l'extraction des ressources.

[99] Le taux de retour énergétique peut être traduit en anglais comme *Energy Return On Investment*

9.2.7. **Material Flow Accounting (MFA)**

Nous avons pu constater que l'économie est un système ouvert qui reçoit et éjecte matière, énergie et déchets. Il est possible d'introduire des perspectives analytiques qui ne soient pas limitées à des considérations financières, et de générer des dimensions parallèles ainsi que d'autres indicateurs que ceux traditionnellement utilisés en économie. C'est le cas de l'estimation des flux de matières qui vise à quantifier l'échange physique entre l'économie et l'environnement.

Une analyse biophysique de l'économie permet de faire remonter à la surface des impacts environnementaux qui demeurent cachés alors que seulement les flux monétaires s'analysent et s'évaluent de façon trationelle.

Dans la course pour la croissance et l'argent, le poids des variables économiques est souvent dissimulé et relègue au second plan les effets secondaires négatifs. Si la performance des exportations des produits est évaluée uniquement en termes économiques, les autres dimensions écologiques, sociales, sanitaires, etc., sont les grands perdants (Giampietro, 2004). En revanche, la comptabilité du flux d'énergie a une longue tradition (Martinez-Alier, 1987. Cleveland *et al.* 2000). L'Agence internationale de l'énergie (AIE) prévoit un suivi régulier des flux d'énergie socio-économiques à l'échelle mondiale. De plus, la littérature est actuellement focalisée sur la question des déchets (Arp *et al.* 2017).

Les limites du modèle de Flux de matières

Même si le modèle de Flux de matières a fait des contribution sur l'etudes du metabolisme urbain, il est notamente confronté à certaines limites. La première est que le flux de matières ne révèle pas la toxicité des processus de production et les caractéristiques de la biodiversité qui disparaît. La deuxième difficulté réside dans le traitement des données agrégées et la production d'estimations grossières, qui présentent le risque d'occulter des éléments qui pourraient s'avérer cruciaux à l'heure de prendre des décisions. Par ailleurs, nous pouvons constater de autres difficultés comme le fait que la plupart des informations qui peuvent être générés à partir d'indicateurs proposés pour ce modèle ont des limites référentielles pour la réalisation de données fiables. Il faudrait toutefois explorer davantage champs.

D'une part, l'introduction de ce point de vue analytique est destinée à compléter et enrichir le débat sur le fonctionnement du secteur, tout en contribuant à l'élargir sur la contribution écologique, les limites à la production et l'exportation de flux introduits dans le pays. D'autre part, cette analyse représente une porte d'entrée pour encourager des enquêtes similaires pour d'autres secteurs qui produisent des actifs. De plus, l'esprit et non seulement de quantifier la contribution de la nature à la croissance économique mondiale, mais également de souligner les restrictions que cette même contribution représente pour notre propre développement.

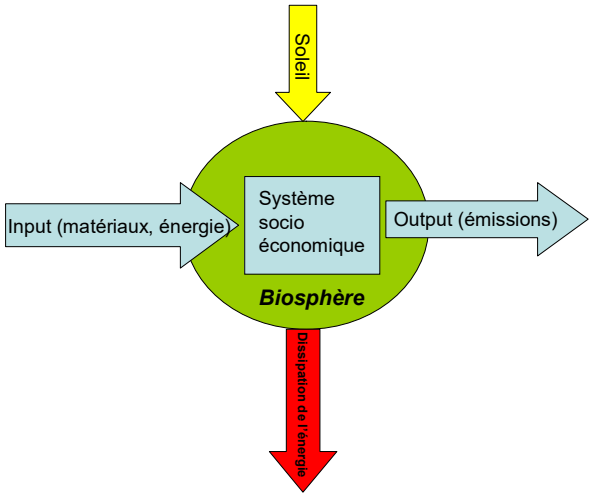
Modèle de flux de matières vers un métabolisme de l'écosystème

Après cette introduction aux fondamentaux de MFA, il nous semble important d'expliquer le concept de métabolisme appliqué à la ville.

Par définition, le métabolisme est un concept biologique qui fait référence aux processus internes d'un organisme vivant. Les organismes maintiennent un échange continu de matière et d'énergie avec leur environnement qui permet leur fonctionnement, leur croissance et leur reproduction. De la même

manière, les systèmes sociaux transforment les matières premières en produits manufacturés, en services et en déchets. Cette façon de interpreter l'interaction entre la société et la nature comme une question d'échanges physiques vient de certains penseurs du XIX-ème siècle et, aujourd'hui de *l'économie verte* (figure 9.2.7.1) (Ayres *et al.* 1969, 1994 ; Boulding, 1973).

Figure 9.2.7.1 le métabolisme social



Source : L'Auteur

Concernant l'analyse du métabolisme de la société, elle fournit un cadre permettant de distinguer les cultures, les sociétés ou les régions, les caractéristiques de la nature en fonction des termes de l'échange. Le *métabolisme de la société humaine* est donc notion utilisée pour caractériser les processus de transformation d'énergie et de matière dans une société (Giampietro *et al.* 2001). Cette notion est devenue une discipline scientifique à partir du milieu du XIXe siècle en raison des travaux d'auteurs comme : Ostwald(1907, 1911); Lotka(1922, 1956); Vernadski(1926); Zipf(1941); White(1949); Cottrell (1955); Georgescu-Roegen(1971).

Durant les années 70, l'énergie et le métabolisme des matériaux de la société humaine ont été largement appliqués aux systèmes agricoles, en général pour décrire l'interaction entre les systèmes socio-économiques et de leur environnement. Cette interaction a été etudié par : Georgescu-Roegen(1971); Odum(1971, 1983); Rappaport(1971); Leach(1976); Gilliland(1978); Slesser(1978); Pimentel *et al.*(1979); Morowitz(1979); Costanza(1980); Herendeen(1981); Hall *et al.*(1986); Smil(1987); Ayres *et al.*(1994); Fischer-Kowalski(1998) et plus récemment par : Giampietro *et al.*(2000); Fischer-Kowalski *et al.*(2007); Ramos-Martin *et al.*(2005,2007); Sorman *et al.*(2011); Arp *et al.*(2017).

Pour finir, nous pouvons affirmer que le MFA est lié au concept d'économie circulaire, car le schéma du flux de matière peut être considéré comme un parcours de rétroaction fermé ou assez fermé qui se compose de *production de ressources, de consommation de ressources, et de recyclage des ressources.* Compte tenu de la structure du flux matériel et de sa pertinence pour l'économie circulaire, on peut en conclure que la théorie du MFA contribuera à la recirculation des ressources naturelles (Chen, 2009).

9.2.8. **Multi-Scale Integrated Analysis of Societal and Ecosystem Metabolism**

La méthode d'analyse Multi-Echelle qui intègre des métabolismes de la société et des écosystèmes (MuSIASEM) qui a été introduite par Giampietro et Mayumi (1997, 2000a, 2000b, 2003). C'est une tentative de représenter un métabolisme à travers un numéraire énergétique en Giga Joules.

Dans cette méthode :

(I) Le flux des matières et d'énergie peut être analysé en utilisant les concepts des métabolismes endosomatique[100] et exosomatique[101] par rapport au modèle *fund-flow* de Georgescu-Roegen (Georgescu-Roegen, 1969, 1970, 1971). Il est basé sur la distinction entre *fund* (*les agents d'un processus de production comme le capital, le travail et la terre du modèle Ricardian*), et le *flows* (*les éléments qui sont utilisés ou sollicités par les agents*) (Georgescu-Roegen, 1971).

(2) La structure du budget dynamique du métabolisme peut être analysée à l'aide de l'analogie bioéconomique de l'*hypercycle* (Eigen *et al.* 1978) et des parties dissipatives dans les écosystèmes (Barbir *et al.* 2007).

Cet ensemble de flux peut être quantifié par trois indicateurs :

Tableau 9.2.10.1 : Représentation des indicateurs de MUSIASEM

Indicateur	*Numéraire*	*Description*
ERoEI Point of Use (pou)	Giga Joules/Giga Joules	Tiens compte de l'énergie requise pour obtenir et approvisionner l'énergie.
ERoEI Extended (ext)	Giga Joules/Giga Joules	Tiens compte de l'énergie requise pour obtenir, approvisionner et utiliser l'énergie.
ERoEI Standard(st)	Giga Joules/Giga Joules	Tiens compte de l'énergie requise pour obtenir l'énergie.

Source : L'auteur

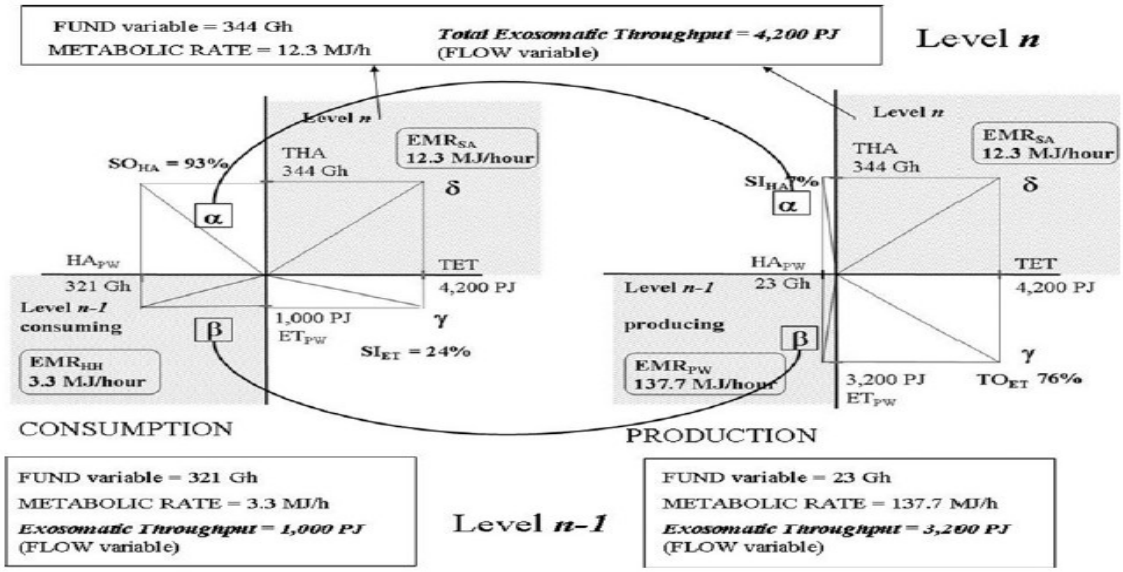
La figure 9.1.8.1, montre une représentation exosomatique où les différentes valeurs d'EMR[102] peuvent être utilisées pour caractériser la manière dont le capital et l'énergie exosomatique (*input*) sont transmis entre la production et la consommation dans les différents niveaux comme ***n-1*** (l'extérieur du système) et ***n*** (l'intérieur du système).

[100] Les termes de métabolisme endosomatique et exosomatique, étaient introduits par Georgescu-Roegen (Georgescu-Roegen, 1975), en s'appuyant sur la notion originale de Lotka pour indiquer les flux d'entrées de l'énergie et des matières sous le contrôle humain transformé en présence de processus socio-économique *à l'intérieur* ' (endosomatique) et *à l'extérieur* (exosomatique) du corps physique des membres d'une société donnée.

[101] idem

[102] EMR : L'intensité de l'énergie biophysique de l'économie en MJ/jour.

Figure 9.2.8.1: La méthode d'analyse multiéchelles (MuSIASEM).



Source : Giampietro *et al.* 2009

En bref, l'approche MuSIASEM permet de vérifier la performance du métabolisme des systèmes socio-économiques par rapport à l'existence de contraintes écologiques. Comme nous l'avons vu MuSIASEM est un indicateur en utilisant l'EROI pour mesurer l'intensité matérielle à travers les concepts de métabolismes endosomatique et exosomatique, mais il ne propose pas un indicateur de bouclage direct. Finalement, nous avons l'impression qu'il pourrait être adapté pour mesurer un bouclage de flux en utilisant leur structure, mais aucun exemple en ce sens n'a été décelé à travers notre revue de littérature sur le sujet.

9.2.9. **Physical Input-Output Tables (PIOT)**

Les tableaux d'entrées-sorties physiques, en anglais *Physical Input-Output Tables* (cf. section 4.4.2), et désignés ci-après par l'acronyme PIOTs, donnent une description complète des émissions des flux de matière suivant le principe du bilan matières et de l'efficacité de processus.

Les tableaux ci-dessous représentent les données monétaires (MIOT) et les données physiques (PIOT). Les PIOTs du premier quadrant sont directement comparables au niveau de produits intermédiaires au sein de l'économie que l'on retrouve dans les tableaux d'entrées-sorties monétaires (MIOTs). Dans le troisième quadrant les PIOTs contrairement aux MIOTs ont inclu l'environnement (entrée de ressources) comme une source de matières premières dans la partie des entrées. Les résidus (déchets solides, émissions dans l'eau et l'air) sont considérés dans le deuxième quadrant (Stahmer *et al.* 1996, 1998).

Tableau 9.2.11 : MOIT et PIOT

MIOT

(en termes monétaires)

1er Quadrant	2ème Quadrant
Flux Inter industriels	Demande finale
3ème Quadranr	
Valeur Ajoutée Importations	

PIOT

(en termes phsiques)

1er Quadrant	2ème Quadrant
Flux Inter industriels	Demande finale Résidus
3ème Quadranr	
Entrée de ressources primaires Importations	

Source : Hubacek, *et al* 2003.

Plusieurs modèles ont été proposés par Daly (1968), Isard (1968), Ayres-Kneese(1969), Leontieff (1970) et Victor (1972a,b) (pour plus de renseignement sur les modèles I/O physiques en chapitres IV et VII).

Ces tableaux donnent une description complète des émissions des flux de matières (Hoekstra *et al.* 2015) à travers l'économie et l'environnement, mais il ne propose pas explicitement dans ses structures, un indicateur de bouclage. Il a néamoins été utilisé comme base pour réaliser une variation visant à mesurer l'utilisation du déchet dans la méthode WIO (Nakamura *et al.* 2002).

9.2.10. **Waste Input-Output (WIO)**

Le modèle WIO intègre simultanément les notions d'entrées et sorties, et de flux résiduels. Il a été développé par Nakamura *et al.* (2002) à partir des travaux de Leontief (1936) tenant compte de l'interdépendance des secteurs des émissions et traitement de polluants en instrants, d'où le concept d'analyse de cycle de vie (ACV).

Ce tableau développé au Japon comprend environ 80 secteurs de production de biens et une dizaine de méthodes de traitement prenant la forme d'une incinération avec différentes options de récupération comme : le traitement des résidus, le déchiquetage, le compostage, la gazéification et la mise en décharge d'environ 40 types du déchets industriels et du déchets d'origine ménagère (Nakamura *et al.* 2002) (cf. section 4.4.2).

Ces tableaux donnent une description complète des productions de déchets. Ils ont été utilisés comme base pour composer l'indicateur d'économie circulaire proposée par Li (2012). Cette méthode définit le coefficient de réduction directe des déchets a_{ij}, avec OW_j comme la contribution maximale totale directe ou indirecte à la production du déchets dans le secteur j, et z_{ij} comme la quantité des déchets produits i utilisée dans le secteur j.

$$a_{ij} = \frac{z_{ij}}{OW_j} \qquad i, j=1,2, \ldots,n \tag{9.2.12.1}$$

Ensuite les intrants A et les sorties B peuvent être formalisés comme suit :

$$A=\{a_{ij}\}=\begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \Lambda & a_{00} \\ a_{21} & a_{22} & \Lambda & a_{2n} \\ \mathrm{M} & \mathrm{M} & \mathrm{M} & \mathrm{M} \\ a_{n1} & a_{n2} & \Lambda & a_{nn} \end{bmatrix} \quad B=\{b_{ij}\}=\begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} & \Lambda & b_{00} \\ b_{21} & b_{22} & \Lambda & b_{2n} \\ \mathrm{M} & \mathrm{M} & \mathrm{M} & \mathrm{M} \\ b_{n1} & b_{n2} & \Lambda & b_{nn} \end{bmatrix} = (I-A)^{-1} - I \tag{9.2.12.2}$$

B indique la quantité du déchets qui peuvent être directement ou indirectement réduits des matières premières i dans le secteur j.

$$b_j = \sum_{i=1}^{n} b_{ij} \qquad i=1,2, \ldots,n \tag{9.2.12.3}$$

Ensuite, b_j est défini comme le taux de recyclage, si $b_j > 1$ alors le système est en mode d'économie circulaire (Li, 2011). Cette méthode a été utilisée comme base pour réaliser une variation servant à mesurer le recyclage des déchets dans le secteur du bâtiment (Doussoulin *et al.* 2017).

9.2.11. **National Accounting Matrix including Environmental Accounts (NAMEA)**

Les comptes du type NAMEA (*National Accounting Matrix including Environmental Accounts*) contituent un système d'information statistique qui combinent les comptes nationaux et les comptes de l'environnement au sein une seule matrice.

La matrice NAMEA est organisée de différentes manières, mais les données du module environnemental et du module économique doivent toujours être cohérentes. En général, on utilise des tableaux ressources et emplois (*Supply and Use*). Le tableau *Supply* calcule toutes les ressources en mettant en évidence celles qui sont importées de territoires extérieurs, alors que le tableau *Use* met en évidence des dynamiques de

consommations intermédiaires, la valeur ajoutée produite, les consommations finales et les investissements.

Le système NAMEA se caractérise tout particulièrement par la possibilité de réaliser un budget environnemental avec des données monétaires et physiques déjà existantes, sans que de nouvelles informations soient nécessaires. En définitive, c'est une forme de réagrégation des données provenant de différentes sources (statistiques officielles, agences pour l'environnement, etc.) sous une forme matricielle permettant d'associer aux agrégats économiques les données des pressions environnementales correspondantes (Doussoulin, 2011). Les comptes du type NAMEA comprennent les flux des ressources naturelles utilisées et la pollution générée par les branches d'activité de production et les ménages[103].

Le noyau du NAMEA est un ensemble de tableaux contenant des données économiques et la formation d'une matrice de comptabilité nationale (NAM) qui compilient les comptes nationaux. Les comptes environnementaux (EC) sont constitués de tableaux de données qui contiennent des unités physiques, par exemple les comptes de consommation d'énergie en Ktep[104]. Le système NAMEA n'est pas basé sur d'hypothèses économiques, il est seulement descriptif. Il maintient une ligne de démarcation stricte entre l'économique et les aspects environnementaux. Il peut être représenté en unités monétaires ou en unités physiques. Les types de données environnementales physiques prises en compte dans le cadre NAMEA sont, en particulier, les émissions dans l'air, les émissions d'utilisation des déchets et des eaux usées.

Les comptes des bilans énergétiques montrent que dans l'approvisionnement et l'utilisation de l'énergie ont également inclus les données sur le stock des actifs de sous-sols et des forêts. Les comptes monétaires de l'eau et les comptes sur les taxes environnementales ont déjà été compilés par le NAMEA. Les données économiques comme les taxes environnementales et les dépenses peuvent être montrés dans le NAM.

Les données connues sur les pressions exercées par les agents économiques sur l'environnement sont obtenues par le Centre interprofessionnel technique d'études de la pollution atmosphérique (Citepa)[105], Elles doivent être mises en cohérence avec la nomenclature d'activités française (NAF).

Au même titre que les comptes NAMEA-Air, les comptes de l'énergie sont des domaines d'action hautement prioritaires pour la commission européenne, jusqu'à il y a peu de temps, aucun format officiel n'avait été défini pour la fourniture de données énergétiques dans les comptes environnementaux des NAMEA transmissibles à Eurostat. Par la suite, l'Ifen (institut français de l'environnement) a déposé une demande en ce domaine. Ils ont mis en ouvre une action qu'ils ont intitulé NAMEA-Energy et qui vise à développer les comptes de l'énergie (EA) en matière d'énergie, d'unités physiques et d'unités monétaires.

[103] Les comptes d'émissions préparées en France pour la Namea représenté les suivant gaz á effet de serre (CO2, CH4, N20, HFC, PFC, SF6), polluants acides et photochimiques (As, Cd, Cr, Cu, Hg, ni, Pb, Se, Zn), particules solides (TSM, PM10, PM2, PM1) et métaux lourds (As, Cd, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb, Se, Zn.

[104] Ktep (kilogrammes d'équivalent pétrole). Cette unité d'équivalence permet la comparaison d'énergies différentes dans une unité commune. Par exemple 2 Tep = 23000 KWh

[105] Le Centre Interprofessionnel Technique d'Etudes de la Pollution Atmosphérique est une association à but non lucratif (loi 1901). Le CITEPA identifie, analyse et diffuse des données et des méthodes sur la pollution atmosphérique. Le CITEPA assure la réalisation des inventaires nationaux d'émissions de polluants atmosphériques et de gaz à effet de serre conformément aux engagements internationaux de la France. (source www.citepa.org)

La première phase du projet NAMEA-Énergie a abouti à une séries de comptes entre 1980 et 1999. Elle a consisté en l'analyse des consommations d'énergie disponibles, ainsi que l'élaboration d'une structure pour la construction des matrices de consommations énergétiques. Cette dernière a été organisée par secteur, forme d'énergie et usage. Viennent ensuite la recherche et la mise en forme des données nécessaires à la réalisation des matrices sectorielles de consommations d'énergie par usage ont été entreprises. Finalement la mise en cohérence de ces matrices avec les bilans énergétiques nationaux a été assurée.

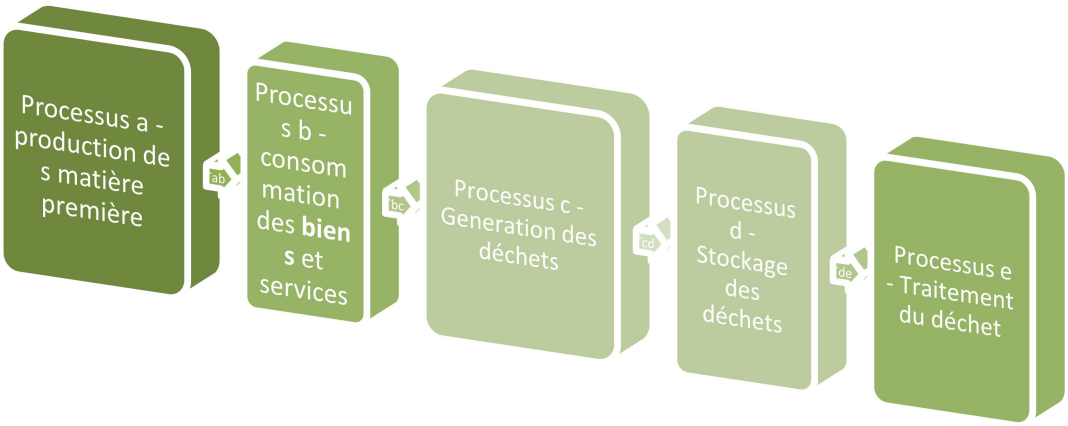
La seconde phase du projet NAMEA-Énergie a été initiée en 2004 en vue, d'obtenir une série complète de matrices NAMEA sur la période 1995-2004.

Finalement, nous avons constaté que le système NAMEA ne mesure pas directement et explicitement un bouclage de flux. Il propose, certes, des comptes de flux de matière, d'énergie et de déchets qui peuvent être articulés pour donner une mesure d'une économie circulaire, mais nous n'avons pas trouvé d'indicateurs qui mesurent directement un bouclage dans notre revue de littérature autour du système NAMEA.

9.2.12. **Les indicateurs de bouclage de flux : Approche de Liu Yifang**

Nous voulons explorer l'indicateur proposé par Yifang *et al* (2007)[106] qui permet d'analyser un bouclage de flux dans un modèle *input-output*. Cet outil va être utilisé comme un indicateur phare de notre thèse où l'économie linéaire peut être représentée par une cascade sans réversion comme suit :

Figure 9.2.12.1. Cascade sans réversion du modèle Yifang (2007)



Source : L'auteur à partir de Yifang *et al* (2007)

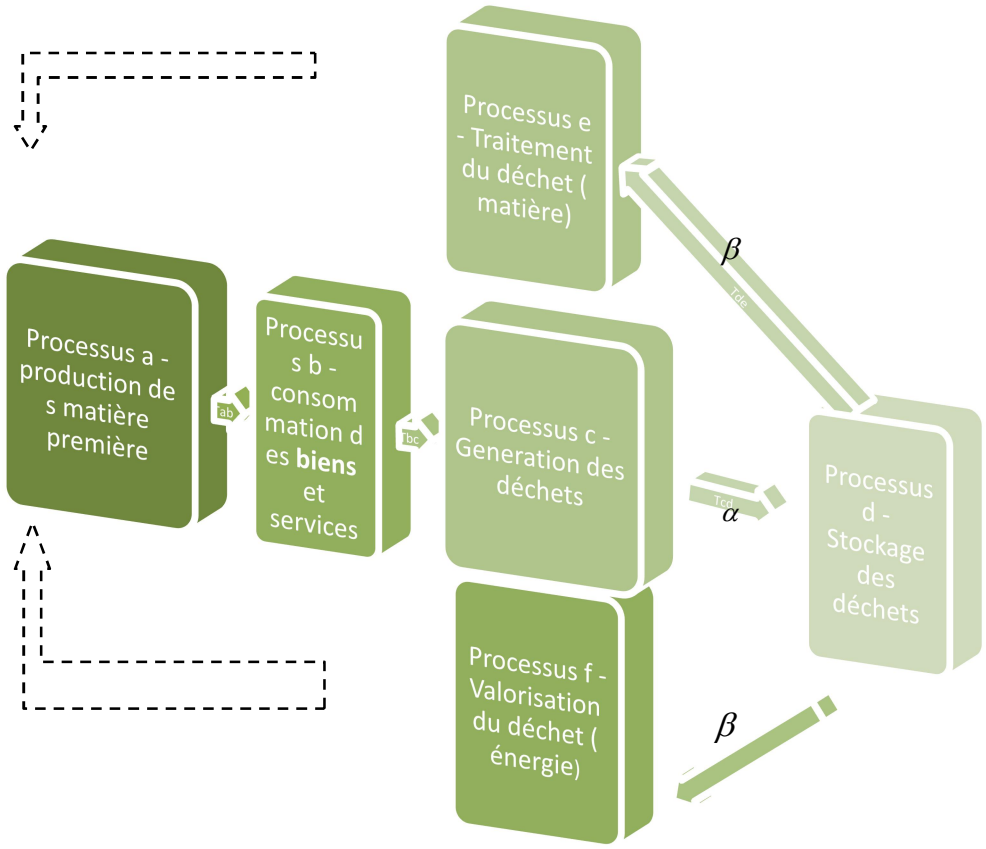
Le schéma ci-dessus montre un flux circulaire qui peut être mesuré en utilisant α comme le ratio de récupération et de stockage du déchet et β comme le ratio qui indique la circularité du système qui mesure la quantité du déchet qui peut être utilisé pour un processus de traitement ou de valorisation.

[106] Le modèle *input-output* de Liu Yifang, Tong Renchen et Xu Jian a été montre dans le *16th International Input-output Conference in Istanbul, Turkey, 2-6 July 2007.*

$$\alpha_i = \begin{cases} \dfrac{X_i^u}{S_i} & i \in 1,\Lambda\ ,k \\ \dfrac{R_i}{S_i} & i \in k+1,\Lambda\ ,m \end{cases}$$

Ensuite, le développement d'une économie circulaire peut être exploré en utilisant les mêmes processus dans le schéma suivant :

Figure 9.2.12.2. Cascade avec réversion du modèle Yifang (2007)



Source : L'auteur à partir de Yifang *et al* (2007)

Le ratio qui indique la circularité du système peut être défini comme β :

$$\beta_i = \begin{cases} \dfrac{p_i^u}{p_i^{u_o}} & i \in 1,\Lambda\ ,k \\ \dfrac{x_{i1}^{rl}}{R_i}.\dfrac{p_1^l}{p_1^{l_o}} + \dfrac{x_{i2}^{rl}}{R_i}.\dfrac{p_2^l}{p_2^{l_o}} + \Lambda + \dfrac{x_{il}^{rl}}{R_i}.\dfrac{p_l^l}{p_l^{l_o}} & i \in k+1,\Lambda\ ,m \end{cases}$$

Les variables peuvent être définiées comme suit :

$p_i^{u_o}$ Un élément p_i de ce vecteur représente le prix du produit naturel i ($i \in 1,\Lambda\ ,k$).

p_i^{u} Un élément p_i de ce vecteur, représente le prix d'un input qui a été recyclé i ($i \in 1,\Lambda\ ,k$) des secteurs de stockage des déchets.

x_{i1}^{rl} Un élément x_i de ce vecteur représente la première quantité physique de l'input industriel i ($i \in k+1,\Lambda\ ,m$). Qui a passé pour un processus de valorisation énergétique à partir de stockage des déchets.

$p_1^{l_0}$ Un élément p_1 de ce vecteur représente le premier prix du produit naturel qui a passé pour un processus de valorisation énergétique.

p_1^{l} Un élément p_1 de ce vecteur représente le premier prix de l'input industriel qui a été valorisé à partir de stockage des déchets.

Dans un contexte de boucle fermée $\beta_i = \frac{p_i^u}{p_i^{u_o}} = 1$ dont la ressource est 100% circulaire.

Une évaluation de la circularité systémique peut être possible à travers la mesure de chaque composant, ou ressource, et s'exprime par la formule :

$$CL = \sum_i \frac{S_i.p_i^s}{\sum_j S_j p_j^s}.cl_i$$

La valeur de *CL* est comprise entre 0 et 1. La valeur proche de 1 indique un haut développement systémique d'économie circulaire. La valeur 0 représentée une boucle ouverte. Ensuite, les variables utilisées pour trouver *CL* et ils peuvent être expliquées comme suit :

S_i Un élément S_i de ce vecteur, obtenu en sommant les éléments de la colonne de secteur de recyclage de matière ou de secteur de valorisation énergétique, si i ($i \in 1,\Lambda\ ,k$) représente l'output total du produit de secteur de recyclage de la matière, si i ($i \in k+1,\Lambda\ ,m$) représente l'output total du produit de secteur de valorisation énergétique.

p_i^s Un élément p_i de ce vecteur, représente le prix d'un input qui a été recyclé i ($i \in 1,\Lambda\ ,k$).

S_j Un élément S_{ji} de ce vecteur, obtenu en sommant les éléments de la ligne de recyclage de matière ou de secteur de valorisation énergétique, si j ($j \in 1,\Lambda\ ,k$) représente la quantité totale de travail qui a été utilisé dans le recyclage de la matière, si j ($j \in k+1,\Lambda\ ,m$) représente la quantité totale de travail qui a été utilisé dans la valorisation énergétique.

p_j^s Un élément p_j de ce vecteur représente le coût de travail qui a été utilisé au recyclage, si j ($j \in 1,\Lambda\ ,k$) représente le coût de travail qui a été utilisé dans le recyclage de la matière, si j ($j \in k+1,\Lambda\ ,m$) représente le coût de travail qui a été utilisé dans la valorisation énergétique.

cl_i $\alpha_i.\beta_i$

Finalement, nous affirmons que le modèle de Yifang mesure directement un bouclage de flux de matière et d'énergie explicitement parce qu'il considère des processus de réversions dans le flux en cascade. Cet indicateur utilise une mesure de flux en cascade comme d'autres indicateurs comme le Footprint, le HANPP et l'EROI, mais il propose en plus un indicateur de bouclage β qui permet de mesurer le bouclage. Donc, une valeur de CL=1 indique un haut développement systémique d'économie circulaire.

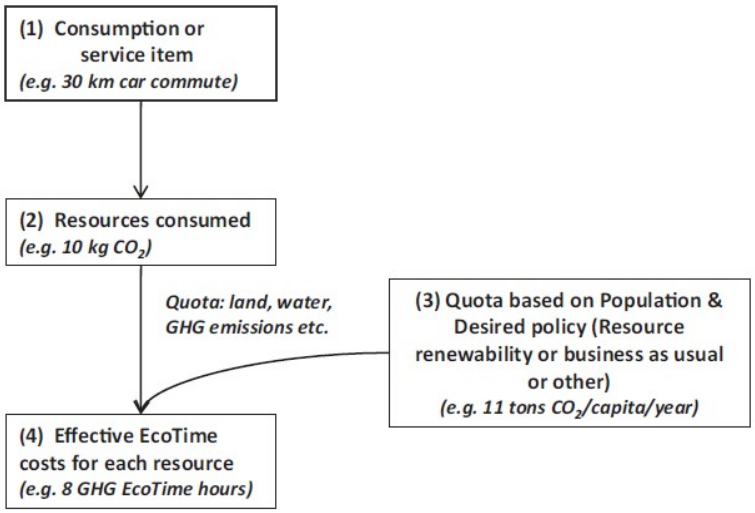
9.2.13. Le modèle didactique de mesure des cycles biogéochimiques : Garry MacDonald

Comme nous l'avons vu dans ce chapitre, une vaste littérature, plutôt hétérogène, est consacrée aux indicateurs et à la typologie des interactions entre économie et environnement. Intuitivement, nous pouvons explorer les facettes de cette question en termes de cadre conceptuel du modèle I/O appliqué à l'environnement. Ce dernier met l'accent sur le type d'indicateur et le numéraire qui est mesuré à partir de Smith (2014) pour explorer la relation entre l'économie et l'environnement (on peut trouver plus de renseignement en annexe IX.A).

Nous nous proposons maintenant d'étudier l'indicateur *Ecotime*, qui mesure la valeur relative du cycle biogéochimique en fonction du temps. La méthodologie que nous proposons est basée sur la transformation et la consommation de ressources ou marchandises de l'environnement en utilisant une unité de temps (minutes, heures, jours, etc) comme numéraire.

Nous pouvons analyser l'ecotime à travers les *inputs* ou ressources comme la terre et l'eau qui sont utilisés par les processus économiques. Il se représente par l'expression $\mathcal{E}_i^{e,k}$ qui exprime le temps de processus k qui est utilisé pour faire un produit e, en utilisant un *input* i.

Figure 9.2.13. La méthodologie d'Ecotime



Source : adaptée de Shepon *et al.* 2012

Le tableau 9.2.13 montre un exemple des *inputs* ou ressources qui sont utilisés par les processus dans la terre, l'eau et l'émission. Dans cet scénario de moyenne efficience la voiture a une empreinte carbone de 10kg $C0_2$ pour 30km de parcours avec 11 tonnes d'émissions de GES (*gaz à effet de serre).* Ensuite, les 8 GHG (GES) Ecotime représentent les 8800 heures que nous utilisons pour produire chaque année les *outputs* (Shepon *et al.* 2012).

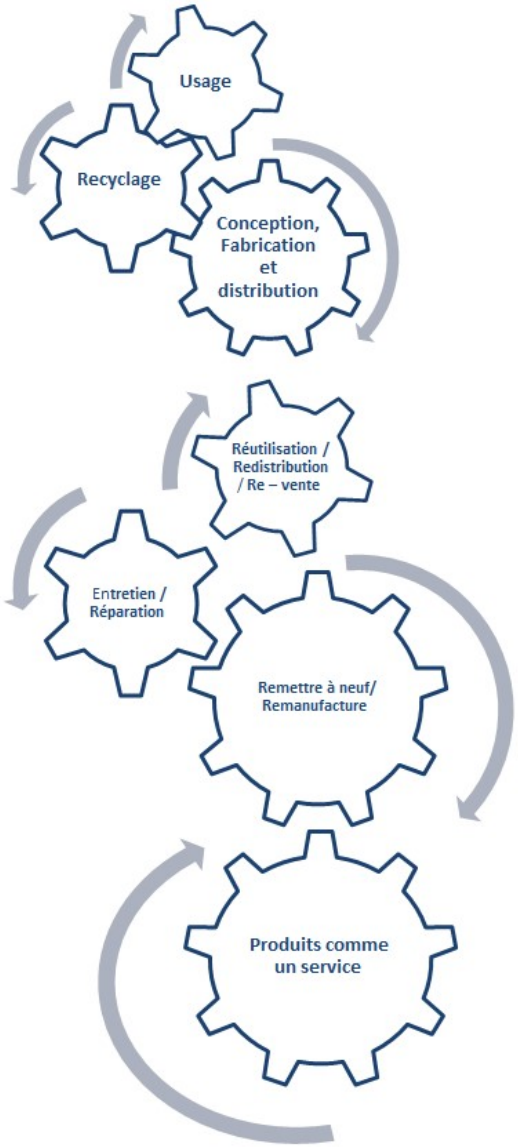
Une fois qu'un ensemble d'ecotimes ont été déterminés pour un processus particulier, nous pouvons retracer l'appropriation de ceux-ci par le système économique. En notation matricielle $v^{e,k} = L^{-1}\rho^{e,k}$ où $v^{e,k}$ représente le vecteur des ecoprices pour tous les processus k qu'on utilise pour fabriquer un produit e, l'inverse de la matrice de coefficients techniques de Leontief est représenté pour L^{-1} et le vecteur $\rho^{e,k}$ mesure la consommation dans les processus k qui sont utilisés pour faire un produit e (Smith *et al.* 2014). Une attention particulière doit être accordée à l'hypothèse de la sélection d'une technologie appropriée pour chaque produit.

Nous nous apercevons que l'indicateur Ecotime évalue en fonction du temps la valeur relative du cycle biogéochimique. Nous pouvons retracer l'appropriation de ceux-ci par le système économique. Donc, il utilise comme numéraire le temps pour donner une mesure d'une cascade thermodynamique. Néanmoins il ne mesure pas la quantité des ressources qui retournent vers la biosphère dans un processus de réversion. Dès lors, le modèle n'était pas adapté a nos besoins de mesurer explicitement un bouclage de flux.

9.3. Application des outils physico-économiques adaptés pour mesurer les processus circulaires

Les méthodes déjà montrées peuvent être utilisées conjointement pour mésuser un parcours circulaire en utilisant la figure B du premier chapitre sur l'actif et la passif écologique et les outils proposés dans la dernière section. Notre approche peut être reformulée pour mesurer les opportunités d'économie circulaire. Dans cette démarche, les processus circulaires peuvent être définis comme montre la figure 9.3.1.

Figure 9.3.1 : Les processus circulaires



Source : L'auteur

A. Conception, fabrication et distribution

Ce premier groupe peut être décomposé en trois parties comme suit:

1. Réduction en l'utilisation de matières premières ou dématérialisation qui, implique d'utiliser le moins de matière possible. Il fait partie de la miniaturisation, la pondération de lumière ou physique aux services numériques à travers l'utilisation de MFA et MUSIASEM.

Outils
Material Flow Accounting (MFA)
Multi-Scale Integrated Analysis of Societal and Ecosystem Metabolism (MUSIASEM)

2. Optimisation dans l'usage de matériaux qui signifie la sélection des meilleurs matériaux pour assurer une chaîne d'approvisionnement durable :

- Réduction des intrants biologiques ;
- Utilisez de matériaux recyclés ;
- Réduction des matériaux rares ;
- Élimination des substances toxiques ;
- Utiliser des matériaux de faible émission du carbone.

Nous pouvons assurer l'optimisation en utilisant les outils ci-dessous :

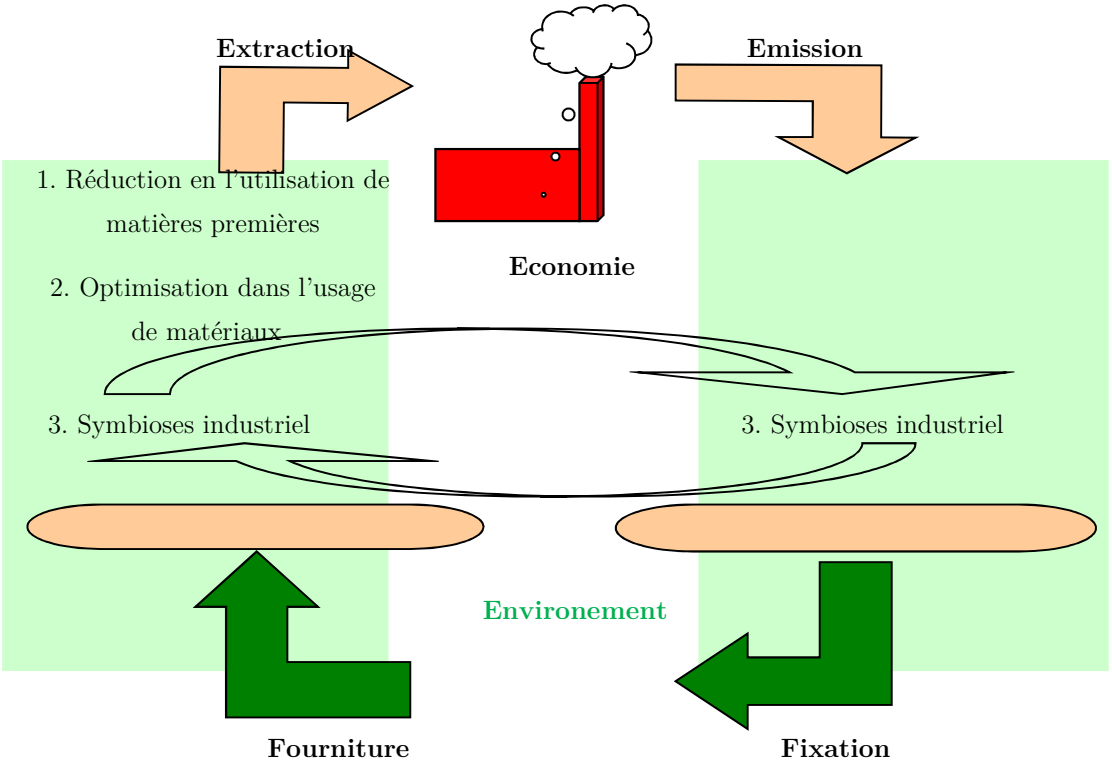
Outils
Ecological footprint
Human Appropriation of Net Primary Production (HANPP)
Water footprint
Le concept d'eau virtuelle
L'Indice biologique global normalisé (IBGN)

3. Symbioses industrielles : La symbiose industrielle est l'échange physique de matières ou d'énergie entre les entreprises dans un territoire où les déchets d'une entreprise deviennent une ressource pour une autre société. Les matériaux analysés comprennent, entre autres l'eau, la chaleur, de la vapeur, les cendres, le papier, de sciures, la carte, le pétrole, les minéraux et les métaux . Ce symbiosis peut être réussi en utilisant MFA, MIPS pour les flux de ma matière et EROI et MUSIASEM pour les flux énergétique.

Outils
Material Flow Accounting (MFA)
Multi-Scale Integrated Analysis of Societal and Ecosystem Metabolism (MUSIASEM)
Energy Return on investment (EROI)
Material Input per Unit Service (MIPS)

Finalement la figure 9.3.2, montre une représentation des processus de conception, fabrication et distribution en utilisant la notion d'actif et de passif écologique.

Figure 9.3.2 : Les processus circulaires dans la conception, la fabrication et la distribution



Une symbiose industrielle consiste aussi en la réutilisation et l'échange de matières (ex. : les sous-produits comme les émissions), d'eau ou d'énergie. Ces échanges forment des synergies entre les émissions et la fourniture de ressources dans un système.

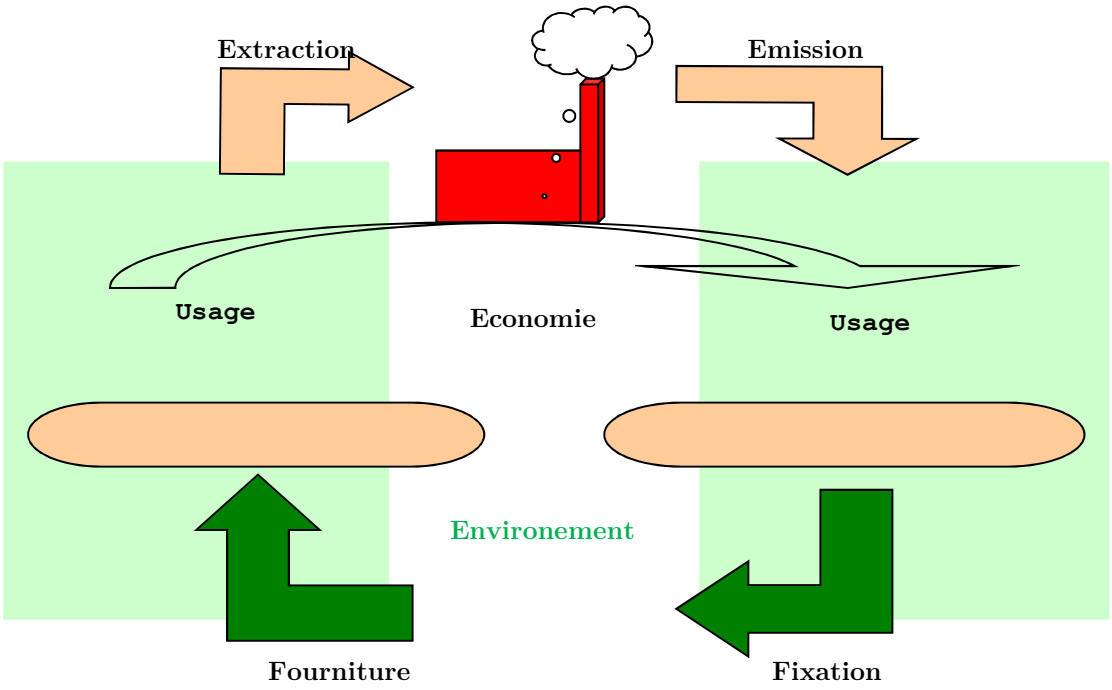
B. Usage

Le but de cette stratégie est d'étendre la durée de vie du produit et d'améliorer son efficacité en matière de consommation des ressources. Cependant, si le produit est consommer, les ressources et, la durée de vie du produit doit être adaptées à son efficacité. Ensuite les outils ci-dessous sont proposés pour mesurer l'usage:

Outils
Ecological footprint
Water footprint
Le concept d'eau virtuelle
L'Indice biologique global normalisé (IBGN)
Energy Return on investment (EROI)
Material Flow Accounting (MFA)
Multi-Scale Integrated Analysis of Societal and Ecosystem Metabolism (MUSIASEM)

La figure 9.3.3, montre une représentation des processus d'usage en utilisant la notion d'actif et de passif écologique.

Figure 9.3.3 : Les processus circulaires dans l'usage



L'usage, comme le montre la figure 9.3.3, utilise les ressources du compartiment d'extraction pour produire un bien avec un polluant de l'environnement, donc un émission, qui peut être mesuré comme une empreinte sur l'eau ou l'écologie (*footprint*), ou comme une mesure d'intensité (EROI).

C. Entretien / Réparation

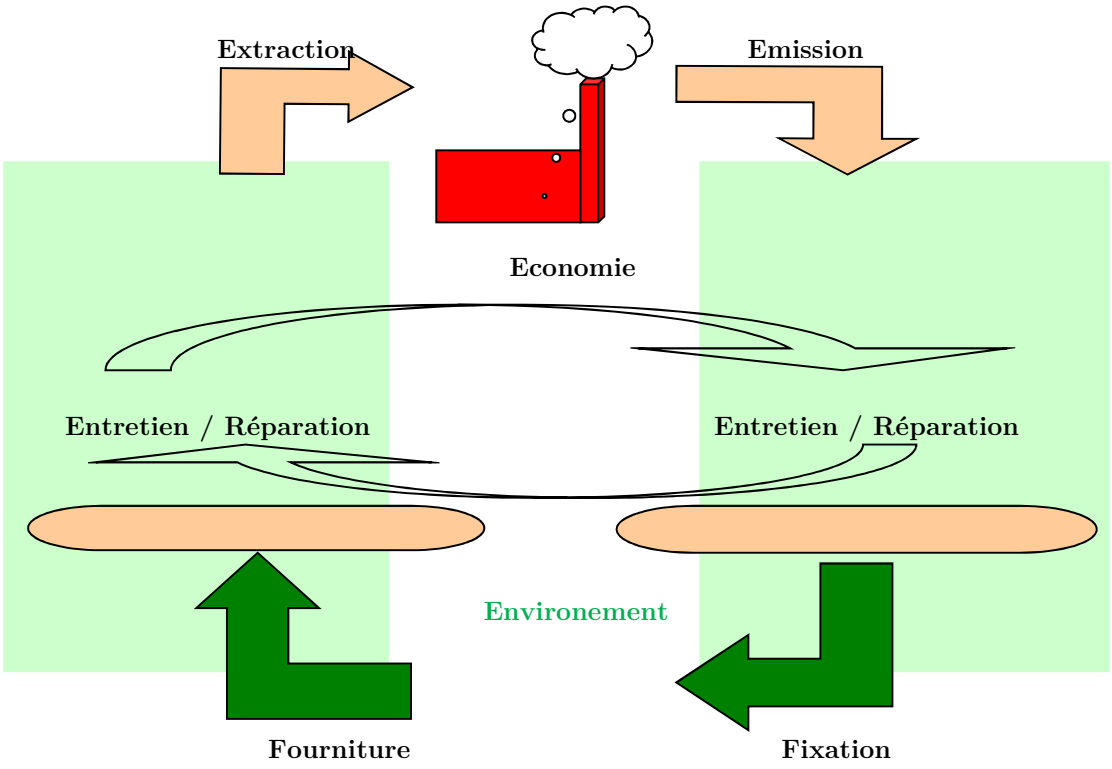
L'entretien et la réparation sont parmi les activités critiques réalisées dans la phase d'utilisation afin de prolonger la disponibilité des marchandises. Les offres de maintenance peuvent inclure : les réparations, l'entretien, les diagnostics sur place et à distance, le support technique avec documentation et personnel, l'installation et la garantie.

Ces processus qu'utilisent de matière et d'énergie peuvent être mesurés pour les outils suivants :

Outils
Material Input per Unit Service (MIPS)
Energy Return on investment (EROI)
Material Flow Accounting (MFA)
Multi-Scale Integrated Analysis of Societal and Ecosystem Metabolism (MUSIASEM)

La figure 9.3.4, montre une représentation des processus d'entretien et de réparation en utilisant les notions d'actif et de passif écologique

Figure 9.3.4 : Les processus circulaires dans l'entretien et la réparation



Ce type de processus permet d'élargir la durée de vie des produits, mais il présente un coût direct et indirect pour l'environnement. Ainsi, le coût indirect est la pollution et la mise en relation de l'utilisation de l'énergie et de main d'oeuvre qui doit être renouvelée dans autres processus urbains des ménages.

D. Réutilisation / Redistribuer / Revente

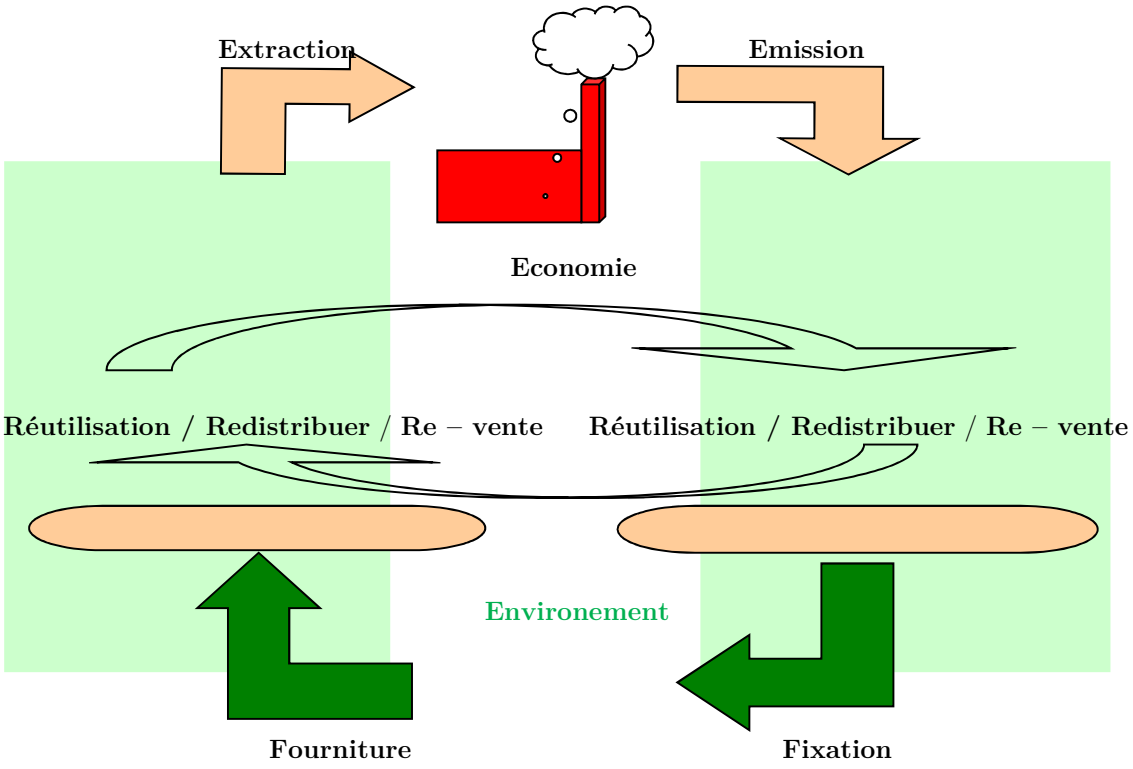
La réutilisation ou la revente secondaire directe étend la durée de vie du produit par l'utilisation. Les produits peuvent être revendus, de manière complète ou partielle. Des services supplémentaires peuvent inclure des tests, de la certification et des re- garanties.

Ce type de service utilise de l'énergie qui peut être mesuré en utilisant MIPS ou EROI

Outils
Material Input per Unit Service (MIPS) Energy Return on investment (EROI)

La figure 9.3.5, montre une représentation des processus de réutilisation, de redistribuer et de revente en utilisant la notion d'actif et de passif écologique.

Figure 9.3.5 : Les processus circulaires de réutilisation, de redistribuer et de revente .



La redistribution devrait être moins polluante que les autres processus déjà décrits en A,B,C, mais elle utilise de l'énergie sous la forme de pétrole pour le transport. En conséquence, elle demeure une source importante de pollution.

E. Remettre à neuf/ Remanufacture

Les processus de prise de produits utilisés dénommés «noyaux» et la restauration de leur qualité et/ou de leur esthétique :

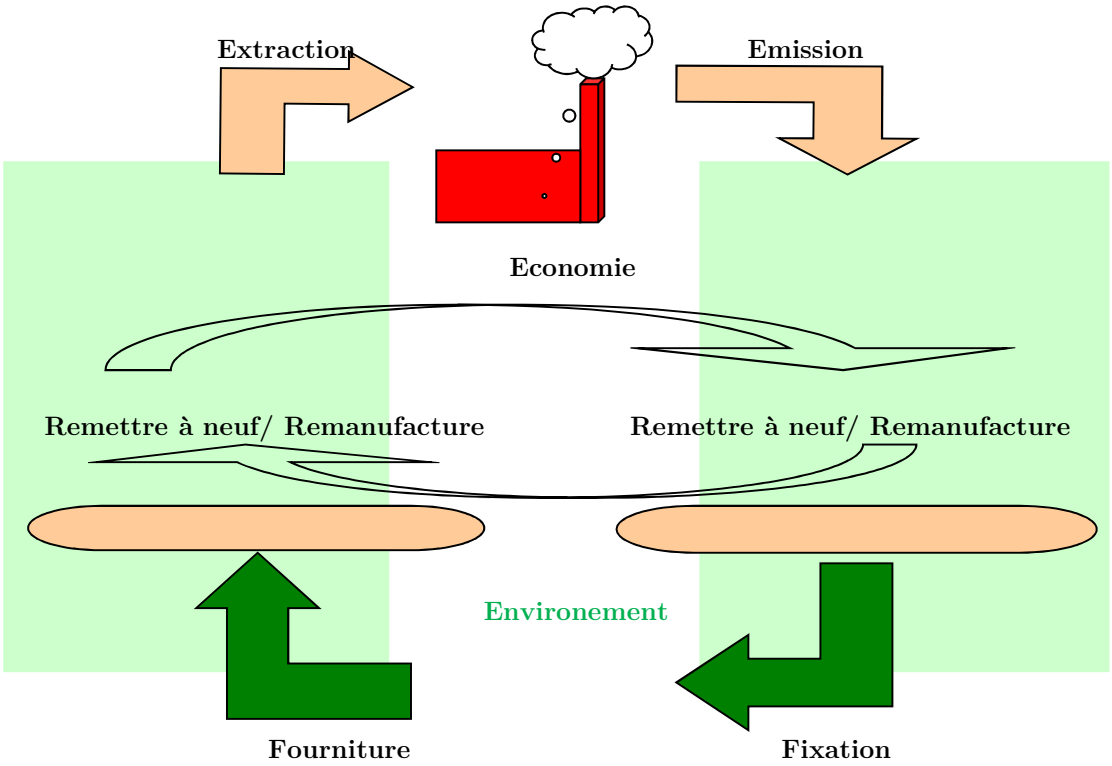
- Rénovation - Retour aux spécifications de fabrication d'origine
- Rénovation - «comme neuf», avec une meilleure qualité et/ou esthétique

La remanufacture utilise de matière et d'énergie qui peuvnet être mesurées à travers les outils ci-dessous :

Outils
Material Input per Unit Service (MIPS)
Material Flow Accounting (MFA)
Multi-Scale Integrated Analysis of Societal and Ecosystem Metabolism (MUSIASEM)

Ensuite la figure 9.3.6, présenté une typologie des processus comme le remettre à neuf et la remanufacture en utilisant la notion d'actif et de passif écologique.

Figure 9.3.6 : Les processus circulaires comme le remettre à neuf et la remanufacture.



Contrairement au processus de recyclage, la remanufacture permet de récupérer la majeure partie de matière du produit après sa fabrication comme une fourniture du produit remis à neuf, mais il crée un passif écologique du fait de l'utilisation d'énergie pour sa remanufacture.

F. Recyclage

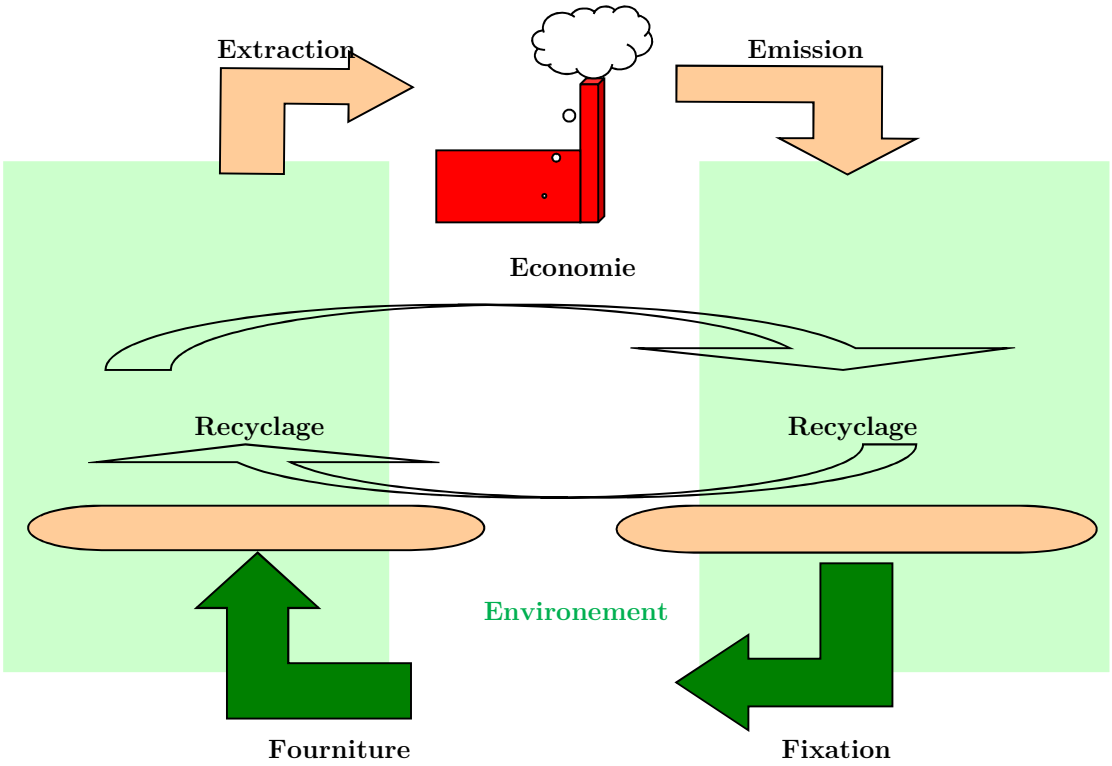
Le recyclage est le processus d'utilisation des matériaux à la fin de leur durée de vie pour produire des nouveaux produits. Les produits doivent être conçus de manière à ce qu'ils soient séparables et réutilisables à la fin de leur vie utile.

Ce type de processus peut être mesuré à travers des outils suivants :

Outils
PIOT – WIO
NAMEA
Ecological footprint
Human Appropriation of Net Primary Production (HANPP)
Material Input per Unit Service (MIPS)
Water footprint
Energy Return on investment (EROI)
Material Flow Accounting (MFA)
Multi-Scale Integrated Analysis of Societal and Ecosystem Metabolism (MUSIASEM)

La figure 9.3.7, montre une représentation des processus de recyclage en utilisant la notion d'actif et de passif écologique.

Figure 9.3.7 : Les processus circulaires comme le recyclage.



Cette méthode utilise le déchet comme un intrant pour la période de production suivant. Ce flux peut être mesuré par les outils déjà décrits. Par ailleurs, il existe une littérature abondante sur cette méthode qui sera révisée dans la cinquième partie de la thèse.

G. Produits comme un service

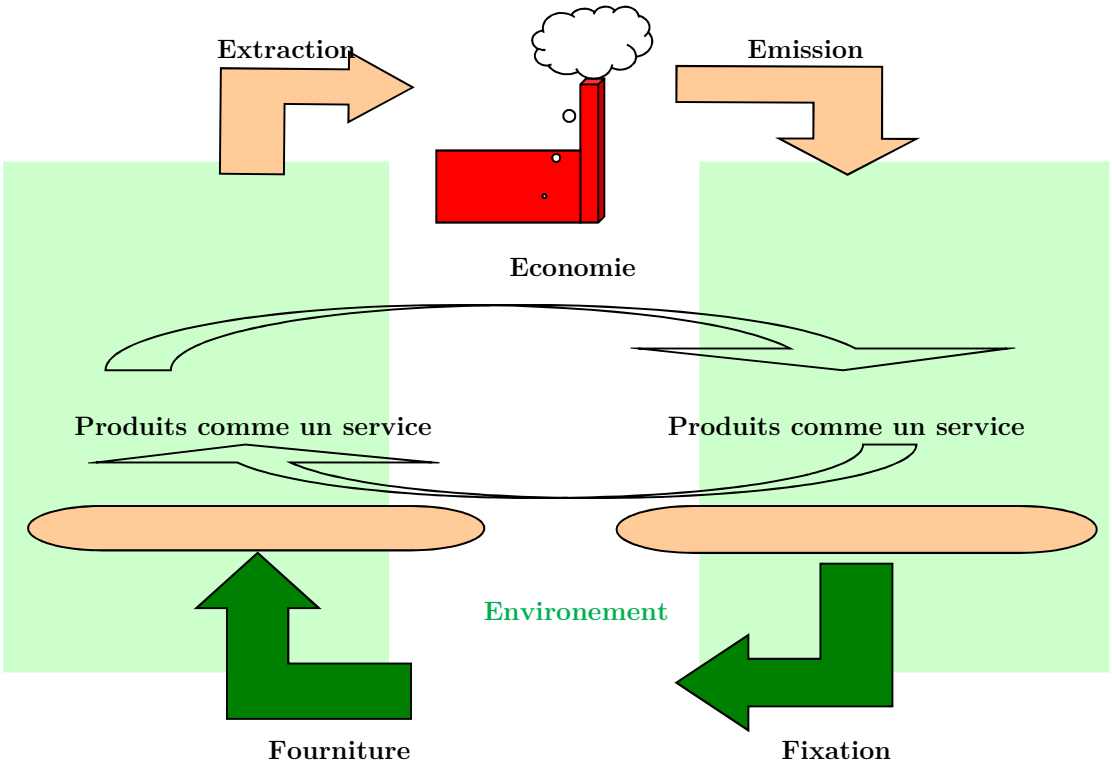
Au lieu de vendre classiquement des produits, il est possible des les offrir en tant que services. Le fournisseur a généralement la propriété du produit tout au long du cycle de vie et peut gérer ce dernier par la conception, l'utilisation, l'entretien, la réutilisation, la remise à neuf et le recyclage.

Ce service peut être mesuré en utilisant MIPS :

Outils
Material Input per Unit Service (MIPS)

La figure 9.3.8, montre une représentation des processus de produits comme un service en utilisant la notion d'actif et de passif écologique.

Figure 9.3.8 : Les processus circulaires de représentation d'un produit comme un service



Pour évaluer et mesurer une économie de la fonctionnalité ou PSS (*Product Service System*), l'indicateur MIPS peut être utilisé pour mesurer le passage de la vente d'un bien vers la vente d'un service. Par exemple, le passage de la vente d'un appareil de chauffage à la vente d'un confort thermique, ou encore le passage de la vente d'un pneumatique à la vente d'une solution de mobilité.

9.4. Conclusion du Chapitre 9

Tout d'abord l'économie circulaire s'appuie sur sept piliers correspondant aux dimensions dont la prise en compte est indispensable dans tout processus d'évaluation de la circularité. Ces piliers sont de nature économique et sociale. Ils ne sont pas indépendants les uns des autres, mais plutôt marqués par de fortes interactions qui sont à la base de la problématique de bouclage de flux. Concilier des objectifs interdépendants et de natures diverses pour analyser les pressions exercées par les activités du système socio-économique sur le capital naturel, les déchets ou l'empreinte écologique.

Cette vision à sept piliers est aussi valable dans le domaine où la durabilité se pose en termes d'actif/passif. D'après Passet cette notion est employée dans les systèmes d'exploitation de la biosphère pour désigner *la capacité de reproduction des principaux éléments qui les constituent (les ressources exploitées et le milieu naturel qui les abrite, les éléments économiques, sociaux et techniques) et des fonctionnalités qui les structurent* (Payot, 1979 ; Passet, 1996). Toute stratégie d'évaluation et de choix d'indicateurs de bouclage de flux de matière et d'énergie doit alors permettre de refléter l'État actuel, les changements et les caractéristiques structurelles du système.

Finalement dans la cinquième partie de la thèse, nous voulons analyser une étude de cas qui s'inscrit dans l'évaluation du recyclage du déchet urbain et industriel comme source de compost et d'énergie. Ces bouclages seront mesurés en utilisant l'indicateur proposé par Yifang. Cet indicateur est selon nos critères le plus efficient et adaptable à notre sujet. D'un côté, il permet de travailler avec nos types de données physiques. D'autre part, il va permettre d'utiliser les prix relatifs déjà expliqués dans les chapitres V et VIII.

10. LES OUTILS D'EVALUATION D'UNE ECONOMIE CIRCULAIRE : LES DEMARCHES INSTITUTIONNELLES

CES ENJEUX ECOLOGIQUES ET THERMODYNAMIQUES DES CYCLES biogéochimiques ont été soulignés aux chapitres VII et VIII. En ce sens, l'évaluation et la mesure des cycles à été examiné à travers de deux courant de pensée simultanées (*simultanées mouvements*) (Moore, 2015). Le premier groupe déclare que le capitalisme a été capable d'internaliser la planète vivante et ses processus biogéochimique. Un second groupe déclare l'internalisation du capitalisme comme faisant partie de la biosphère (Moore, 2015). A partir de cette deuxième doctrine, nous pouvons formuler notre approche pour analyser l'appropriation de l'économie. Ce type de processus d'appropriation peut être présenté en utilisant des groupes d'indicateurs technico-institutionnels proposés par des institutions formelles comme l'ADEME ou l'Union Européenne. Ces groupes d'indicateurs décrivent l'usage des ressources et leurs effets sur l'environnement, à l'instar des déchets ou de l'empreinte écologique des éléments des cycles de la biosphère.

La section 10.1 présente une brève description de chaque groupe d'indicateurs et de leurs numéraires qui sont pour leur part présentés en annexes X.A à X.G.

10.1. Présentation des outils proposés par les institutions

Étudier la performance de l'économie circulaire implique de s'intéresser aux flux de matière et d'énergie au niveau territorial. Il faudrait considérer les groupes d'indicateurs capables d'intégrer et de mesurer le bouclage des activités humaines et de leurs interactions avec la biosphère.

Dans un premier temps, nous illustrerons au moyen tableau 10.1.1 les groupes d'indicateurs de circularité proposés par des institutions comme notamment l'Ademe et la fondation Ellen MacArthur . Dans un deuxième temps, nous présenterons chaque groupe d'indicateurs de manière plus détaillée.

Tableau 10.1.1 : Présentation des outils proposés par les institutions

	Numéraire des indicateurs		
Institution	physique	économique	sociale
ADEME	*X*	*X*	*X*
Fondation Ellen MacArthur	*X*		
Global Reporting Initiative (GRI)	*X*		
Impact Reporting and Investment Standards (IRIS)	*X*		*X*
EEA (European Environment Agency)	*X*		
Projet européen NETGREEN	*X*	*X*	*X*
EU-EMAS (Environmental management system)	*X*		
SROI (Social Return on Investment)	*X*		

10.1.1 **Les indicateurs de l'ADEME**

Généralités

L'ADEME propose un ensemble d'indicateurs correspondant les déchets dans la brochure *Chiffres-clés Déchets - Édition 2014*. Elle adopte la hiérarchie européenne concernant les déchets (cf. annexe X.A).

Matières mobilisées

Les *matières mobilisées* par l'économie française sont l'ensemble des quantités physiques de matières premières issues du territoire national ou importées en vue de satisfaire les besoins de l'économie française (ADEME, 2014a).

Production des déchets

Chaque année en France, un habitant produit 354 kg d'ordures ménagères. Les calculs sont réalisés par l'ADEME à partir du tonnage des poubelles des ménages (hors déchets verts) collectées par les collectivités locales[107].

Prévention des déchets

La *prévention* de la production du déchets consiste à réduire la quantité et la nocivité des déchets produits. Juridiquement, l'article L.541-1-1 du Code de l'environnement définit la prévention comme étant :

> *" toutes mesures prises avant qu'une substance, une matière ou un produit ne devienne un déchet, lorsque ces mesures concourent à la réduction d'au moins un des items suivants*
> *-la quantité du déchets générés, y compris par l'intermédiaire du réemploi ou de la prolongation de la durée d'usage des substances, matières ou produits ;*
> *-les effets nocifs des déchets produits sur l'environnement et la santé humaine ;*
> *-la teneur en substances nocives pour l'environnement et la santé humaine dans les substances, matières ou produits "*[108].

Collecte des déchets des ménages

Ensemble des opérations consistant à enlever les déchets et à les acheminer vers un lieu de transfert, de tri et de traitement ou une installation de stockage des déchets.

---

[107] Pour avoir plus d'information en détaillé sur les donnés des poubelles des ménages collectées par les collectivités locales, consulter le site: *http://www.cniid.org/Les-dechets-en-France-quelques-chiffres* (site consulté le 25 septembre 2016).

[108] Pour plus des informations, voir l'article L.541-1-1 du code de l'environnement, consulter le site: *http://www.developpement-durable.gouv.fr/La-Prevention-de-la-Production-de.html* (site consulté le 25 septembre 2016).

Le tableau 10.1.1.5 montre le type de collecte du déchets en utilisant le DMA[109] (Déchets ménagers et assimilés) et le OMA[110] (Ordures ménagères et assimilées) tel que précisé dans un rapport de l'ADEME :

Le Tableau 10.1.1.5 : Le type de collecte du déchets

	Type de collecte
DMA / OMA	**Ordures ménagères résiduelles**
OMA	**Collecte sélective du verre** : Collecte en porte à porte ou en apport volontaire du verre uniquement. Le verre collecté avec les emballages ou celui collecté en déchèteries n'est pas comptabilisé dans ce type de collecte.
OMA	**Collecte sélective des EJM des ménages** : Collecte en porte à porte ou en apport volontaire des Emballages et Journaux Magazines ou plastiques. Le verre est quelquefois collecté en mélange avec les emballages dans ce type de collecte. Les matériaux recyclables collectés en déchèteries ne sont pas comptabilisés dans ce type de collecte.
OMA	**Collecte sélective des déchets verts et des biodéchets** : Collecte en porte à porte ou en apport volontaire des déchets verts ou des biodéchets. Les déchets verts collectés en déchèteries ne sont pas comptabilisés dans ce type de collecte.
DMA	**Collecte sélective des encombrants** : Collecte en porte à porte ou en apport volontaire des encombrants. Les encombrants collectés en déchèteries ne sont pas comptabilisés dans ce type de collecte.
DMA	**Collecte sélective des déchets dangereux** : Collecte en porte à porte ou en apport volontaire des déchets dangereux. Les déchets dangereux collectés en déchèteries ne sont pas comptabilisés dans ce type de collecte.
DMA	**Déchèteries**

Source : ADEME, 2009

Collecte des déchets des entreprises

Selon un rapport sur la collecte et l'analyse d'informations sur les exemples, les méthodes et les outils de prévention des déchets en entreprises et la rédaction de supports de diffusion réalisée pour l'ADEME, les entreprises (hors agriculture et BTP) produisent 3 fois plus du déchets que les ménages. En outre, l'enjeu environnemental de ces déchets porte tant sur les entreprises que à la collectivité (ADEME, 2013a).

Échanges transfrontaliers du déchets

La convention de Bâle est un protocole sur la responsabilité et l'indemnisation en cas de dommages résultants de mouvements transfrontiers et de l'élimination du déchets dangereux (PNUE, 2014).

[109] (DMA) : OMR + les déchets des collectes sélectives + les déchets collectés en déchèterie, soit la totalité des déchets des ménages et des activités économiques pris en charge par le service public. Source : ADEME, 2009

[110] (OMA) : Les OMA sont constituées des Ordures Ménagères Résiduelles (OMR) et des déchets collectés sélectivement, soit en porte à porte, soit en apport volontaire : verre + emballages et journaux-magazines (matériaux secs). Elles comprennent également, à la marge, les collectes sélectives de biodéchets alimentaires. (OMR) : part des ordures ménagères collectées en mélange, restant après collectes sélectives.
Source : ADEME, 2009

“ La Convention de Bâle sur le contrôle des mouvements transfrontières du déchets dangereux et leur élimination adoptée le 22 mars 1989 est entrée en vigueur le 5 mai 1992. Elle pose un certain nombre de principes : - tout transfert du déchets vers un pays tiers doit être réalisé dans des conditions ne présentant aucun danger pour la santé humaine et l'environnement ; - les États doivent prendre des mesures pour assurer un échange approprié d'information et un contrôle effectif des mouvements transfrontaliers du déchets dangereux et d'autres déchets en provenance et à destination d'autres États ” (MEDDE, 2014).

Traitement des déchets non dangereux dans les ITOM

L'étude des données concernant les installations de traitement des déchets ménagers (ITOM) permet de faire un état des lieux sur le parc d'installations de traitement, de transit et de mise en décharge du déchets ménagers et assimilés. Ces activités ont été caractérisées en fonction des flux entrants/sortants dans ITOM (ADEME, 2010b) .

L'origine des données peut être classifiée de la façon suivant [111] :

1. Les données des installations de traitement (hors stations de transit et plates-formes de maturation des mâchefers) ;
2. La liste des centres de tri des déchets ménagers et assimilés y compris ceux qui acceptent aussi les déchets provenant des entreprises ;
3. Les plateformes de compostage des déchets ménagers et assimilés ;
4. Les plateformes de broyage des déchets ménagers et assimilés ;
5. Les installations de méthanisation du déchets ménagers et assimilés ;
6. Les usines d'incinération des ordures ménagères avec valorisation énergétique des déchets et installations de fabrication de combustibles dérivés des déchets ;
7. Les usines d'incinération des ordures ménagères sans valorisation énergétique des déchets ;
8. Les installations de Stockage du déchets non dangereux (ISDND) ;
9. Les plateformes de maturation des mâchefers issus de l'incinération des déchets.

Dans ce type d'étude, il faut noter l'impossibilité de suivre les DAE (déchets d'activités économiques) à partir du moment où ils sont mêlés aux DMA (déchets ménagers et assimilés) dans les centres de tri et de transit. "*Les résidus de traitement sont les refus de tri, de compostage, les mâchefers et les résidus de broyage automobile (RBA). Ils sont parfois identifiés comme provenant de DAE, mais la plupart du temps comme provenant d'installations de traitement*" (Ordif, 2012).

Finalement, l'approche de l'ADEME présente des indicateurs de flux comme : la production du déchet comprise comme la répartition du tonnage du déchets ménagers et assimilés collectés par typologie d'habitat, l'évolution du parc de centres de tri accueillant des déchets ménagers et l'évolution des tonnages envoyés en compostage ainsi que celle du compost produit. Mais il ne propose pas un indicateur de bouclage direct comme la méthode de Yifang. Par contre, nous pensons qu'il pourrait être adapté pour mesurer un bouclage de flux en utilisant leur structure.

[111] Pour obtenir de plus amples reseignements sur les données du classement, consulter le site : http://www.sinoe.org/proxy/visite-requete-predef/idReq/ITOM/region/ALL/departement/-1/idTheme/1 (site consulté le 26 septembre 2016).

De surcroît, nous avons trouvé un exemple d'indicateur de mesure de l'incorporation des matières premières de recyclage comme le papier, le carton et les plastiques dans notre revue de littérature. Celui-ci a été proposé par le SOeS [112](2017). Pour ces raisons nous pensons que ce groupe d'indicateurs est adaptable à l'approche ADEME.

10.1.2 **Global Reporting Initiative (GRI)**

Global Reporting Initiative(GRI) est une organisation créée en 1997 par la Coalition des Economies Responsables de l'Environnement (CERES) et le Programme pour l'Environnement des Nations Unies (PNUMA). La GRI a développée le Guide pour la préparation d'un rapport de développement durable, dont la première version fut publiée en 2000, la deuxième en 2002, la troisième en 2006 et la version G4 au cours l'année 2015 (GRI, 2015).

Sa mission est d'améliorer la qualité, la rigueur et l'utilité des rapports de durabilité pour atteindre un niveau équivalent à l'information financière. Il se fonde principalement sur la mise en œuvre de la ligne de triple fond ou *triple botton line* : économique, social et environnemental.

Les principes pour assurer la qualité et la présentation appropriée de l'information divulguée (GRI, 2014) sont :

- Bilan: Le rapport devrait refléter les aspects positifs et négatifs de la performance organisationnelle pour permettre une évaluation motivée de la performance globale ;
- Comparabilité: Vous devez sélectionner, collecter et diffuser les aspects de l'information cohérente. L'information divulguée est présentée de manière à permettre aux parties prenantes d'analyser les changements dans l'organisation au fil du temps et par rapport à d'autres organisations ;
- Précision: Les informations doivent être exactes et suffisamment détailles pour les différentes parties prenantes de l'organisation pour évaluer la performance de l'organisation ;
- Fréquence: L'information sera présentée dans les délais et selon un horaire régulier pour que les intervenants puissent prendre des décisions avec la bonne information ;
- Clarté: L'information doit être présentée de manière compréhensible et accessible aux parties prenantes ;
- Fiabilité: Les informations et les procédures suivies dans la préparation d'un rapport doivent être recueillies, enregistrées, compilées, analysées et présentées de manière à pouvoir être soumises à l'examen de la qualité et de l'importance de l'information.

[112] Le service de l'observation et des statistiques (SOeS) du ministère de l'Environnement, de l'Énergie et de la mer, en charge des relations internationales sur le climat.

Le dossier produit en utilisant la méthode de GRI comporte 3 parties:

A. Profil: Information qui définit le contexte global de l'entreprise et donne un aperçu de la performance de l'organisation, entre autres par ses pratiques stratégiques, son profil et sa gouvernance d'entreprise. La vision et la stratégie de développement durable doivent être signées par le Président de la société ;

B. Approche de gestion: informations sur le style de gestion par lequel une organisation aborde les aspects spécifiques et décrit le contexte pour comprendre son comportement dans un domaine particulier. Par exemple, la société gére des systèmes, en termes de structures de décision et de gestion pour contrôler ces décisions. Un autre exemple est l'engagement des parties prenantes dans les politiques sociales et environnementales ;

C. Indicateurs de performance économiques, environnementaux et sociaux. Ils sont classés en indicateurs principaux et optionnels. Les indicateurs présentent ont des informations comparables sur la performance économique, environnementale et sociale de l'organisation.

La méthode de GRI est composée de 49 indicateurs et de 10 supplémentaires (GRI, 2013). Pour évaluer les opportunités d'une économie circulaire, nous retenons principalement ceux qui s'intéressent aux notions de réduction, de réemploi et de recyclage à savoir les 3R proposés dans le cadre de l'économie circulaire. A cet egard, les indicateurs retenus sont au nombre de 12 et peuvent êtres classifiés en 4 types (on peut trouver de renseignement sur les indicateurs en annexe X.B):

1. Les matériaux consommés et la part des matériaux recyclés ;
2. La consommation d'énergie ;
3. La consommation d'eau ;
4. La production du déchets.

Pour finir, nous affirmons que le GRI est lié au concept d'économie circulaire, car le schéma du flux de matière peut être considéré comme un parcours de rétroaction fermé ou assez fermé ou relativement fermé qui tient compte des notions de 3R. Compte tenu de la structure du flux matériel et de sa pertinence pour l'économie circulaire, nous concluons qu'il y n'aucun indicateur qui permet de mesurer directement et explicitement un bouclage de flux, même si la théorie du GRI peut être articulée pour développer des indicateurs de mesure explicite d'une économie circulaire.

10.1.3 **Impact Reporting and Investment Standards (IRIS)**

IRIS est une initiative du Réseau d'investissement Global Impact (GIIN) qui offre des indicateurs de performance sociale, environnementale et le soutien financier pour la définition, le suivi et la présentation d'information sur le rendement du capital investi et l'impact social donc une double rentabilité.

> *"Le concept de double rentabilité dépasse celui de RSE. L'impact investing est un investissement réalisé dans des entreprises, organisations et fonds qui ont l'intention de générer un impact social et/ou environnemental mesurable. Les entreprises visées par l'impact investing assument*

l'ambition de mettre leur activité économique au service d'un impact social positif (Novetic, 2013)"[113]

Les systèmes de *reporting* peuvent être adoptés via les étapes suivantes (IRIS, 2011):

Étape 1. Identification des domaines d'impact: il faudra déterminer les principaux impacts sociaux et environnementaux associés aux activités de l'organisation ainsi que d'autres impacts importants pour les parties prenantes de l'organisation ;

Étape 2. Détermination des indicateurs IRIS applicable: pour chacune des zones d'impact identifiées, il s'agit de voir normes IRIS et d'identifier les paramètres de mesure applicables. Il faudra commencer par des indicateurs intersectoriels, puis examiner les indicateurs "sectoriels spécifiques" pour les secteurs concernnant l'organisation ;

Étape 3. Mettre en place des protocoles de reporting: dans cet étape il faut déterminer comment les acteurs recueilleront l'information et la fréquence à la quelle cette dernière sera présentée. De plus, il importe de créer ou adapter les processus d'affaires pour recueillir les données nécessaires pour chaque indicateur sélectionné.

Ce groupe d'indicateurs montrent les conditions financières favorables à l'investissement principalement social. Il fournit une grille de plus de 400 indicateurs. Ceux-ci sont classés en 5 sections: description de l'organisation, description du produit, performance financière, impact des opérations et impact du produit.

De manière génerale, nous pouvons dire sur la méthode IRIS qu'il y n'a pas d'indicateurs mesurant directement et explicitement un bouclage de flux. Néanmons, il y a des indicateurs plus adaptables à l'économie circulaire. Ceux-ci sont classés dans les sections sur l'impact des opérations et l'impact du produit (cf. annexe X.C).

10.1.4 **Les indicateurs proposés par l'EEA (European Environment Agency)**

La politique environnementale permet de créer des opportunités économiques et contribue à la stratégie *Europe 2020*, qui vise à faire de l'UE (Union européenne) une économie intelligente, durable et inclusive d'ici 2020 (EEA, 2015).

Le nouveau package sur l'économie circulaire de l'Europe vise encourager les entreprises et les consommateurs à adopter un modèle économique plus circulaire. Un objectif commun des Etats Membres de l'UE est le recyclage de 65% des déchets urbains, le recyclage de 75% des déchets d'emballages et la réduction de la décharge d'enfouissement à un maximum de 10% des déchets municipaux d'ici à 2030. [114]

Pour réussir cette transformation l'UE propose une sélection d'indicateurs de base qui reposent sur des critères largement utilisés à son contexte et à celui de l'OCDE, tout en l'adaptant aux besoins et aux pratiques de gestion (EEA, 2006). Ces indicateurs peuvent être classés par rapport à leur :

---

[113] Pour obtenir de plus amples reseignements sur les aplications de la methode IRIS en France, consulter le site: http://www.novethic.fr/empreinte-sociale/economie-sociale-et-solidaire/isr-rse/l-impact-investing-vise-aussi-les-benefices-sociaux-139203.html (site consulté le 28 septembre 2016).

[114] Pour des reseignement plus détaillé sur les aplications de l'économie circulaire en Europe, consulter le site: http://ec.europa.eu/environment/circular-economy/ (site consulté le 28 septembre 2016).

1. Pertinence politique : ce critère est comparé avec les objectifs énoncés dans les textes juridiques de l'UE et d'autres domaines internationaux est revu en consultation avec les pays ;

2. Les progrès vers l'atteinte des objectifs : ce critère devient important lorsque les objectifs quantitatifs ou qualitatifs sont énoncés dans les textes réglementaires ;

3. Les données disponibles et régulièrement collectées : cette approche favorise également la rationalisation des flux de données et veille à ce que l'affichage puisse être mis à jour périodiquement ;

4. La couverture spatiale et temporelle : ces critères sont basés sur la couverture réelle des signalements par rapport à la couverture des données attendues pour avoir des tendances temporelles qui remontent, autant que possible dans le temps ;

5. La représentativité nationale de l'échelle des données : cette approche permet des études comparatives des résultats obtenus par pays ;

6. Indicateurs d'intelligibilité : ce critère met l'accent sur la nécessité d'une définition claire de l'indicateur, de son évaluation et de la présentation correcte ;

7. Méthodologiquement bien-fondé : ce critère peut être satisfait par une description claire de la méthodologie et des formules utilisées avec des références scientifiques appropriées ;

8. Les questions prioritaires pour les politiques de l'UE : ce critère est de veiller à ce que les indicateurs soient cohérents avec les priorités établies dans la politique et le plan de gestion de l'EEA.

Dans ce sens, l'UE a proposé des indicateurs pour l'environnement (EEA, 2016). Ceux-ci sont compilés au sein d'une grille de plus de 138 indicateurs classés selon une typologie de 22 groupes d'indicateurs (cf. en annexe X.D).

Finalement, l'approche d'EEA (EEA, 2016) propose un groupe d'indicateur similaire au GRI ou à l'ADEME et qui permet de vérifier la performance des certains processus ou flux linéaires en utilisant le DMC (domestic material consumption) utilisé déjà par l'ADEME ou pour la génération des déchets utilisé par GRI. Elle ne propose toutefois pas d'indicateur de bouclage direct. Pour cette raison, nous pensons que comme les autres, elle pourrait être adaptée pour mesurer un bouclage de flux au moyen de ses indicateurs.

10.1.5 **Les indicateurs d'économie circulaire du Projet européen NETGREEN**

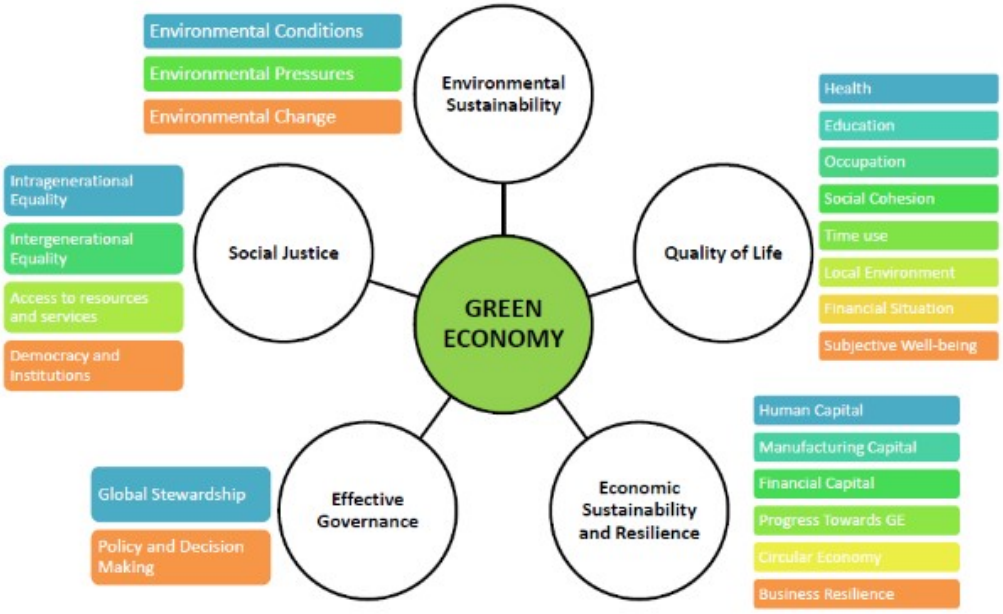
Généralités

Le projet NETGREEN financé par la Commission européenne, fournit une sélection d'indicateurs sur l'économie verte e. Les indicateurs sont présentés dans le site web *http://netgreen-project.eu/.*

Objectifs

Le projet mesure les progrès vers une économie verte e à travers d'un système d'indicateurs. De la sorte, il propose et identifie les indicateurs les plus adaptés aux besoins de décideurs. Le projet a aussi pour objetif de construire une communauté de décideurs et de chercheurs en ligne à travers des ateliers et des événements. De cette démarche ont été développés des indicateurs dans 5 domaines (figure 9.4).

Figure 9.4: Les cinq sujets d'étude



Source : Netgreen, 2015

Le projet propose au regard de la soutenabilité de l'environnement des indicateurs biophysiques comme les entrées dans le processus de production, la destination après utilisation et l'efficacité du recyclage (Akerman, 2016; Taranic *et al.* 2016). Ceux-ci peuvent être articulés pour mesurer une économie circulaire (pour plus de renseignement en annexe X.E).

10.1.6 Le système des indicateurs de l' EU-EMAS (Environmental management system)

L'EMAS est un outil volontaire conçu par la Commission européenne pour l'enregistrement et la reconnaissance publique des entreprises et organisations qui ont mis en place un système de management environnemental.

Les étapes pour adhérer à l'EMAS sont (MEDDE, 2013):

1. Effectuer un diagnostic environnemental de l'entreprise : pour ce faire, l'entreprise doit vérifier le degré de conformité avec la législation actuelle de l'environnement proposée par l'UE ;
2. Évaluer comment l'environnement influe sur les activités de l'entreprise (impacts produits par des procédés de fabrication, des produits ou des services rendus) ;
3. Développer une déclaration environnementale où il est démontré que la société a mis en place un système de gestion de l'environnement afin de minimiser leurs impacts environnementaux ;

4. Valider la déclaration environnementale par des critiques indépendants (défini comme vérificateur environnemental) ;

5. Présenter la déclaration environnementale validée par le vérificateur de l'administration publique compétente.

Ce système d'indicateurs permet de réaliser une comparaison de la performance environnementale d'une usine dans différentes conditions et sur différents territoires. Cette méthodologie[115] a été retravaillée dans le rapport de la commission européenne de janvier 2017 (EC, 2017). Néamoins, elle ne propose pas d'indicateur de bouclage direct malgré la proposition de politiques publiques pour développer une économie circulaire.

10.1.7 La méthode pour mesurer le SROI (Social Return on Investment)

L'objectif du SROI est de générer des bénéfices sociaux avant les bénéfices financiers. Un cadre d'analyse sur cette perspective s'est formalisé autour du concept du SROI (The SROI Network, 2012).

Le SROI comporte six étapes (The SROI Network, 2012) :

1. Établir et identifier les principales parties prenantes. Il est important de conaître le périmètre que couvre votre analyse SROI, quels acteurs sont impliqués dans le processus et comment ;
2. Faire une carte des résultats au moyen de l'interaction avec les parties prenantes ;
3. Démontrer et valoriser les résultats ;
4. Établir l'impact en utilisant les informations recueillies sur les résultats, et leur monétarisation ;
5. Calculer le SROI. Cette étape consiste à ajouter tous les profits, en soustrayant le coût et comparer le résultat avec l'investissement ;
6. Partager les résultats avec les parties prenantes, incorporer les bons procédés et résultats, et vérifier le rapport.

Le SROI fournit une grille de plus de 798 indicateurs dans 23 domaines d'évaluation. Ces domaines donnent en revanche lieu à très peu d'indicateurs d'économie circulaire, ils se concentrent principalement sur les déchets et les produits dangereux (on peut trouver plus de renseignement en annexe X.G). Ainsi, nous considerons que le SROI pourrait être envisagé comme un indicateur complémentaire pour mesurer l'impact social d'un bouclage de flux, comme par exemple le recyclage de déchets ménagers en milieu urbain (SBP, 2014).

[115] Pour des reseignements plus complets sur les indicateur voir l'annexe X.F.

10.2. Les indicateurs d'économie circulaire proposés par la Fondation Ellen MacArthur

Généralités

Ces indicateurs ont pour but d'apporter des réponses définitives et d'évaluer l'évolution d'une entreprise d'un modèle linéaire vers un modèle circulaire. La fondation MacArthur a proposé un indicateur qui tente plutôt d'identifier et de décrire les grands changements que un bouclage apporterait à l'économie territoriale. Ce dernier propose une quantification directionnelle des changements les plus importants.

Les indicateurs

La fondation MacArthur propose une diversité d'outils et d'indices pour accompagner et mesurer le développement d'une économie circulaire.

Par la suite les approches et les indicateurs de circularité de l'économie industrielle proposée par la fondation Ellen MacArthur (2010) seront explorées plus en détail.

L'approche de la fondation MacArthur définit V comme une indicateur de ressource non utilisée, telle $(1-F_R-F_U)$ comme une fraction des ressourcés naturels, et M comme un scalaire qui présente une quantité physique des outputs:

$$V = M(1-F_R-F_U) \qquad 10.1.2.1$$

Ensuite F_R et F_u peuvent être défini comme suit :

F_R *Le scalaire représente une fraction de ressource qui a été valorisée comme énergie.*

F_U *Le scalaire représente une fraction de ressource qui a été recyclée.*

W_c est une partie déchets non récupérable sortie du processus de collecte qui peuvent être valorisé énergétiquement comme suit :

$$W_c = M(1-E_C)C_R \qquad 10.1.2.2$$

E_C *Le scalaire représente l'efficience (%) du processus de recyclage à partir du déchet*

C_R *Le scalaire représente le déchet qui s'utiliser dans un processus de recyclage.*

W_F est une partie déchets finale non récupérable sortie du processus de recyclage peut être présentée comme suit:

$$W_F = M\frac{(1-E_F)F_R}{E_F} \qquad 10.1.2.3$$

Par la suite, E_F et W_F peuvent être définie comme suit :

E_F *Le scalaire représente l'efficience (%) du processus de recyclage à partir de ressources naturelles*

W_F *Le scalaire représente la ressource naturelle qui s'est utilisée dans un processus de recyclage.*

Une partie des déchets finals non récupérables sortis du processus de valorisation énergétique peut être présentée comme :

$$W_0 = M(1 - C_R - C_U) \qquad 10.1.2.4$$

C_U *Le scalaire représente une fraction de ressource qui a été recyclée.*

Les déchets finals ou outputs non récupérables peuvent être présentés comme :

$$W = W_0 + \frac{W_F + W_C}{2} \qquad 10.1.2.5$$

Ensuite l'indicateur de flux linéaire *LFI* mesuré la quantité des matériaux qui parcourentun flux linéaire.

$$LFI = \frac{V + W}{2M + \frac{W_F - W_C}{2}} \qquad 10.1.2.6$$

V *Le scalaire représente les inputs primaires naturels.*

Le calcule du LFI peut être simplifié en utilisant $E_F = E_F = 1$ et $W_F = W_C = 0$. Dans ce cas, l'indicateur de flux linéaire *LFI* mesuré la quantité des *inputs* primaires naturels V, les outputs finals non récupérables W *et* une quantité physique des *outputs* M.

$$LFI = \frac{V + W}{2M} \qquad 10.1.2.7$$

L'index *MCI* ou indicateur d'économie circulaire a été construit à partir du LFI et un facteur X de taux de profit du cycle de vie du produit.

$$MCI_c = 1 - LFI \cdot F(X) \qquad 10.1.2.8$$

Nous affirmons enfin que l'approche de la fondation Ellen MacArthur mesure directement et explicitement un bouclage de flux de matière parce qu'elle tient compte des processus de *réversions* dans un flux en cascade (cf. sections 2.1 et 8.2). Cet indicateur utilise une mesure de flux en cascade comme d'autres indicateurs de l'ADEME, mais il propose en plus un indicateur de bouclage *MCI* qui permet de mesurer le bouclage en pourcentage.

10.3. Un début des efforts : preparation et adaptation de la base données statistiques pour estimer une modélisation empirique

La base de données propose par l'Eurostat désigné une large catégorie de systèmes de base de données qui, dans certains cas, peuvent avoir des fonctions et des usages radicalement différents. Au fil du temps et d'une nouvelle réalité, et au vu de l'intérêt évident à exposer les données à une interface de calcul diffèrent. Nous sommes conscients que les bases de données ne sont pas spécialement adaptées aux questions posées par les modèles de type *input-output* de l'environnement, modèles de production jointe appliqués à l'économie circulaire et à l'utilisation des indicateurs biogéochimiques des cycles de la biosphère ni à l'interrogation au moyen de tout élément autre définie par la relation entre économie et biosphère. C'est pourquoi nous proposons d'utiliser une quantité limite des indicateurs adaptée aux basses données disponibles.

Toutefois, nous sommes conscients du travail d'un groupe d'experts[116] qui sont au début d'un travail pour établir, d'une part, les basses de donnes statistiques et le niveau de désagrégation de données au niveau national adaptées à l'économie circulaire, d'un autre de donner quelques indicateurs pour enrichir le traitement formel pour adapte les basses de donnes (ex : *input-output*) pour mesurer un bouclage de flux biophysiques.

Pour réussir cette transformation, le groupe d'experts propose une sélection d'indicateurs de base qui reposent sur des critères largement utilisés à son contexte. Ces indicateurs peuvent être classés par rapport à leur[117] :

1. Transition et compétitivité de l'économie ;

2. Production ;

3. Consommation ;

4. Déchets en tant que ressource: matières premières secondaires et eau ;

5. Domaines prioritaires: plastique, aliments, matières premières essentielles, construction et démolition, biomasse et produits biologiques ;

6. Innovation et investissement.

Nous n'avons pas plus de précisions sur le nom d'indicateur, l'unité de mesure et le type de données qu'il utilise.

[116] Groupe d'experts intègre, notamment pour le Professeur Martin O'Connor à la université de Paris-Saclay et des consultants du cabinet de conseil Artemis.

[117] Les données et les références bibliographiques du classement sont actuellement considérées comme confidentielles.

10.4. Conclusion du chapitre 10

Les enjeux associés au bouclage de flux des cycles biogéochimiques sont nombreux et variés. Cependant, en fonction des piliers de l'économie circulaire, ces enjeux peuvent être synthétisés suivant deux grands groupes d'objectifs : d'une part, la préservation de la productivité des écosystèmes, d'autre part, le maintien de la rentabilité économique. La préservation de la productivité découle de la nécessité de sauvegarder les écosystèmes afin d'assurer les conditions favorables à la pérennité des matières premières pour les générations futures.

Ensuite, l'application du modèle d'économie circulaire a pour intérêt de faciliter l'identification et le choix d'un ensemble cohérent d'indicateurs interdépendants (système d'indicateurs) permettant la caractérisation des différentes dimensions de bouclage de flux de matière et d'énergie. Il est difficile de porter un jugement précis sur le bouclage de flux dans les compartiments de la biosphère tant que ceux-ci ne sont pas considérée en rapport avec les indicateurs classiques de flux proposés par l'écologie industrielle. Cependant, ces indicateurs de bouclage de flux font partie des processus de petit et de moyen cycle (cf. chapitré II).

La plupart des approches discutées dans ce chapitre permettent de vérifier la performance de certains processus ou flux, mais ne proposent pas des indicateurs de bouclage direct comme l'indicateur *MCI* de la fondation MacArthur. Cependant nous penons que plusieurs indicateurs peuvent être adaptés afin d'être utilisés ensemble. Ce rassemblement permettra de développer un système pour mesurer un bouclage de flux plus complexe.

Avant d'appliquer ces indicateurs, il est nécessaire d'établir un diagnostic du statut d'un système donné ou de ses différents composants. Dans le cas de la durabilité des matières premières, le statut renvoie au jugement que l'on peut faire sur la variation des quantités en relation avec la valeur des ressources naturelles. Ces systèmes de valeurs sont examinées dans les chapitres suivants, selon la théorie de la production jointe.

CONCLUSION DE LA PARTIE IV

La partie IV a proposé une typologie de quatre structures *input-output* du système pour formaliser les relations économiques physiques.

À la suite de cette typologie, nous avons présenté, un résume qui présente fondamentalement les parcours cycliques et en cascades de biens dans la biosphère. Ces structures ouvertes ou fermes au niveau des frontières. Ils sont dans différents sentiers d'équilibre thermodynamiques. La clé pour comprendre cette relation thermodynamique est l'étude des processus de recyclage de la matière et de dissipation d'énergie dans un système en boucle ou ouvert. Cette étude comprenait une typologie des flux.

La seconde partie mise en évidence la démarche d'évaluation des cycles biogéochimiques. Un moyen de mesurer la taille ou l'échelle des caractéristiques biophysiques qui fournissent des bouclages des cycles passe pour la comptabilisation des flux d'énergie et de matières qui traversent l'économie d'un pays ou d'une région en tonnes, joules, acres, mètres carrés et en unités non monétaires.

En conséquence, la grille de lecture en trois dimensions qui a été proposé dans les parties III et IV de la thèse nous semble un bonne base pour devenir un outils générique d'analyse. Un systématisation de cet outils des trois dimensions permettrait de construire un systeme d'evaluation des performances.

Finalement, la cinquième partie utilisera les outils d'évaluation des frontières entre l'économie et l'environnement. Dans cette évaluation, un groupe déclare que le capitalisme était capable d'internaliser la planète vivante et leur processus biogéochimiques. Un second groupe déclare l'internalisation du capitalisme comme partie de la biosphère (Moore, 2015). Dans ce deuxième groupe, nous pouvons formuler notre approche pour analyser l'appropriation de l'économie. Ce type de processus d'appropriation peut être présent en utilisant des groupes des indicateurs technicoinstitutionnels que décrivent l'usage des ressources et leurs effets sur l'environnement comme les déchets ou passifs écologiques des cycles de la biosphère.

PARTIE V.- AVENIR DE L'USINE DES ORDURES MENAGERES IVRY-PARIS XIII : QUEL PROJET POUR DEMAIN, LORSQUE LA CONJONCTURE TERRITORIALE ET LES OUTILS D'EVALUATION EVOLUENT ?

La Partie I a présenté les grands cycles de la biosphère qui respectent les principes de base de la thermodynamique. Selon ces principes, les indicateurs d'analyse économique et physique des cycles devraient offrir une perspective holistique et pouvoir traiter des thématiques territoriales à hauts degrés de complexité.

En développant le modèle économico-physique présenté à la Partie II, nous avons voulu tester la capacité des modèles *input-output* (I/O) et de production jointe à répondre aux deux lois de la thermodynamique intégrée dans une analyse des flux et de cascades de matière et d'énergie. Pour cela, nous avons premièrement développé une table en format I/O hybride et de production jointe qui permet d'évaluer les ressources en unités physiques. Deuxièmement, nous avons intégré à ce modèle les résultats de recherches récentes sur les dynamiques de flux et de stockage pour le cycle de l'azote à Paris. Ces deux éléments ont permis la prise en compte des interdépendances entre deux cycles biogéochimiques et l'économie. En raison de la limitation des données, nous ne prenons pas en compte tous les parcours d'azote à l'échelle territoriale. L'étude de l'interdépendance entre le cycle biogéochimique et l'économie contribue à élargir la modélisation I/O au bouclage des flux les plus importants, car la plus prioritaire pour une économie circulaire.

Dans le présent parti, nous nous inspirons dans le cas d'étude de l'usine de traitement des ordures ménagères Ivry-Paris XIII pour explorer des représentations des systèmes de la valeur dans trois variation du modèle. Cette application traite de l'impact des activités économiques sur l'appropriation des cycles naturels en utilisant les principes de base de la thermodynamique à l'échelle territoriale.

Dans le contexte de bouclage de flux de matière, le chapitre XI donne une introduction sur la problématique, le contexte et justifie le choix de la méthode. Le chapitre XII examine les frontières entre l'économie et l'environnement (Moore, 2015) dans un modèle de production jointe en utilisant trois cas de bouclage de flux, les processus qui utilisent l'économie comme un *fond* selon la définition de Georgescu-Roegen en 1971. Ils utilisent des matières premières comme des inputs pour produire des biens et des déchets. En addition, le chapitre XIII présente les résultats qui mettent en relations les processus économiques avec les variations des frontières du système.

11. IDENTIFICATION ET STRUCTURATION DU PROBLEME

11.1 Identifier le problème : du neuf côtés déchets

LE PROJET DE TRANSFORMATION DU CENTRE IVRY PARIS XIII est porté par le Syctom, l'agence métropolitaine des déchets ménagers. Crée en 1984, le Syctom exerce au quotidien, depuis plus de trente ans, le service public de traitement et de valorisation de tous les flux du déchets ménagers et assimilés produits par près de 6 millions d'habitants, soit près de 10 % de la population française.

Le nouveau projet doit faire face aux conséquences du développement urbain parisien et francilien, notamment sur la production du déchets, ainsi qu'à des contraintes sociales et gouvernementales de plus en plus complexes. La survie de la filière de traitement et de valorisation des ordures ménagères pourrait donc être compromise. Bien que nécessaire à court terme, l'usine doit entrer dans une réflexion à long terme que prend en compte le caractère indissociable des dimensions environnementale, sociale et économique.

Pour répondre à la question concrète *Quel projet pour demain, alors que les cas et outils d'évaluations évoluent ?,* une approche comportant des trois dimensions peut être pertinente. Cet approche propose un cadre d'analyse qui considére les dimensions biophysiques de traitement des ordures ménagères, les systèmes de valeur associés à cette structure de processus économiques et la gouvernance des frontières aux acteurs.

11.2 Décrire le contexte

Le débat sur la reconstruction du centre Ivry-Paris XIII est plus que jamais d'actualité. Nous retrouvons en toile de fond, la place des déchets dans les espaces urbains.

Le rôle central joué par les espaces urbains est complexe. La ville peut en effet être définie comme un regroupement de populations ne produisant pas elles-mêmes leurs moyens de subsistance alimentaire (Ascher, 2001). Le développement et la dynamique des villes sont donc par nature liés à l'appropriation du capital naturel de zones voisines. Ces enjeux et impacts en amont prélèvent les moyens de production de biens alimentaires dans le milieu rural et aval produisent biens, services et profit pour les propriétaires des ressources en générant des rejets divers. Paris a produit 1196 Kt du déchets ménagers en 2004 ce qui représente 20% des déchets d'Ile-de-France (ORDIF, 2006) [118]. La valorisation agronomique concerne 5%

[118] Les données de la production du déchets ménagers et assimilés ont été trouvés en Quelle gestion des déchets ménagers et assimiles en 2004 ? Enquête et tableau de bord de l'ORDIF, La Défense : ORDIF, 2006.

et la valorisation énergétique et représente 65% des déchets ménagers et assimilés[119]. Cependant, la ville de Paris ne traite aucun de ses déchets sur place et une grande partie des communes confie le traitement de ses déchets au Syctom, l'agence métropolitaine des déchets ménagers (ORDIF, 2004).

Le développement de l'économie circulaire a besoin d'un cadre institutionnel claire, auquel a répondu l'évolution du système légal pour la promotion du bouclage de flux.

Dans un avis aux exploitants d'installations de traitement du déchets et aux exploitants d'installations de production utilisant des déchets en substitution de matières premières, non daté, mais publié au Journal Officiel du 13 janvier 2016, le Ministère de l'Écologie, du Développement durable et de l'Énergie se prononce sur le statut juridique des matériaux recyclés.

Il reconnaît notamment une sortie *implicite* du statut du déchet et souligne par la même que le passage d'une logique de traitement du déchets à une logique de gestion des ressources ne se résume pas à une simple question de sémantique, mais est attaché au statut juridique du déchet, source d'interrogations et de préoccupations pour les opérateurs économiques.

Cette reconnaissance juridique va ouvrir de très intéressantes opportunités pour tous les acteurs de l'économie circulaire produisant ou utilisant des matériaux recyclés, tant pour une valorisation matière qu'énergétique.

Cette publication au Journal Officiel du 13 janvier 2016 était attendue depuis plusieurs mois.

Pour compléter ce cadre institutionnel, il faudrait de toute façon faire un exercice de délimitation pour tracer le contour des resposabilités des circonscriptions. Le pilotage technique peut être soutenu par la Direction régionale Ile-de-France de l'ADEME (laquelle a lancé l'État général de l'économie circulaire du Grand Paris) et au niveau politique pour la direction en charge de l'économie sociale et solidaire, de l'innovation sociale et de l'économie circulaire à la Marie de Paris. Il faut mentionner qu'a été formellement constitué il y a environ deux ans le dialogue entre 21 collectives territoriales, une centaine d'acteurs et 250 personnes qui ont travaillé pour constituer cette politique. Ivry s'inscrit dans cette voie, notamment à travers son plan de prévention du déchet.

Une enquête publique a été finie 19 juillet 2017 qui a permis au Préfet du Val-de-Marne de mettre en conformité le Plan Local d'Urbanisme d'Ivry-sur-Seine (PLU) avec le projet du Syctom de reconstruction de l'usine d'incinération d'Ivry-Paris XIII, qualifié de Projet d'Intérêt Général par le Préfet en février 2016.

11.3 Décrire le périmètre d'étude

La ville de Paris présente des limites stables depuis 1860 avec 105,40 km2, une densité de 20421 habitants/ km^2 et une population 2.147.857 habitants, contre 11 pour l'Ile de France (Barles, 2004) [120]. Ma thèse, par faute de temps, ne pouvait couvrir tous les cycles biogéochimiques, et c'est pour cela que

[119] Valorisation énergétique / total des déchets ménagers et assimiles = 3507/5336 Kt (2002) Valorisation agronomique / total des déchets ménagers et assimiles = 266/5336 Kt (2002). Les données ont été trouvés en : *Etat de la gestion des déchets ménagers en Ile-de-France. Chiffres clés 2002. Tableau de bord régional bisannuel*, La Défense : ORDIF, 2004.

[120] Les renseignements sur le métabolisme urbaine de Paris ont été trouvés en *Mesurer la performance écologique des villes et des territoires : Le métabolisme de Paris et de Ile-de-France* : Barles, 2007.

j'ai choisi comme périmètre de mon étude les déchets azotés (compost) à Paris. Plus précisément, le sujet est focalisé sur l'analyse du projet de transformation du centre Ivry Paris 13. L'usine dispose d'une capacité de traitement de 730.000 tonnes (Ivry94, 2016) par an d'ordures ménagères. Cela correspond aux poubelles de 1.4 million d'habitants. La chaleur dégagée de la combustion est transformée en énergie grâce à un turboalternateur.

11.4 Identifier les acteurs : quelles sont leurs positions ?

Il'objectif de cette brève présentation des acteurs[121] n'est pas de donner des solutions sur le mode de gouvernance le plus durable dans ce contexte urbain, mais d'identifier les acteurs et leurs opinions confrontées à la reconstruction du centre Ivry-Paris XIII. Les catégories d'acteurs sont classées en fonction de ses parties prenantes dans le tableau ci-dessous.

Tableau 11.4: Identisation des acteurs

Acteur	**Opinion explicite de projet**
Syctom	L'agence portée le projet de transformation du centre Ivry Paris 13.
Zero Waste France[122]	L'association proposé une solution alternative au projet, dont le plan B'OM[123].
Collectif 3R	La collective milite pour des solutions alternatives zéro déchet à la mise en décharge, l'incinération, le tri mécano biologique et contre le projet de reconstruction de l'incinérateur d'Ivry-Paris 13.
Marie de Paris Marie d'Ivry sur Seine	Autorité coordinatrice

Source : L'auteur

[121] Nous avons eu des réunion avec les acteurs que participent à la discussion sur la reconstruction de l'usine d'incinération Ivry-Paris XIII pendant la thèse :

1. Participation à la réunion-débat sur le *plan B'OM* et les solutions alternatives zéro déchet à la reconstruction de l'usine d'incinération d'Ivry-Paris13 le 5 novembre 2015.

2. Réunion avec Marie TOUSSAINT, Directrice du Cabinet d'Antoinette GUHL (Adjointe à la Maire de Paris en charge de l'économie sociale et solidaire, de l'innovation sociale et de l'économie circulaire) pour discuter le cas d'étude de la thèse le 17 décembre 2015.

3. Participation à la réunion-débat sur le *plan B'OM* avec les voisins des Ivry-sur-Seine le 18 mai 2016.

4. Participation à l'audience publique pour la reconstruction de l'usine d'incinération Ivry-Paris XIII le 28 juin 2016.

5. Participation à l'assemblé générale du collective 3R pour discuter la reconstruction de l'usine d'incinération Ivry-Paris XIII le 29 mars 2017.

[122] *Zero Waste France*, anciennement connue sous le nom de *Centre national d'information indépendante sur les déchets* (Cniid), crée en 1997, est une association à but non lucratif agréée pour la protection de l'environnement. Spécialisée dans la problématique des déchets, elle mène campagne en faveur d'une gestion écologique de ces derniers notamment grâce à leur réduction à la source (en quantité et en toxicité) et à leur détournement de l'incinération et de la mise en décharge.

[123] Appliqué dans son intégralité, le Plan B'OM entraînerait la création d'environ 700 emplois entre 2016 et 2023, soit au moins 50% plus d'emplois que les projets actuels du Syctom. En outre, Les secteurs et activités stimulés par le Plan B'OM seraient nombreux : réparation, réemploi, collecte de biodéchets. La prévention et le recyclage des déchets sont des activités beaucoup plus intensives en travail humain non délocalisable que la mise en décharge ou l'incinération. Consulter le site : *http://www.planbom.org/* (site consulté le 2 octobre 2016)

Cette gouvernance peut être caractérisée comme l'appropriation des ressources externes pour mieux asservir une économie de type *durable,* cette contradiction dans la définition de *durabilité* entre entre les *mots* et les *acte*s ont été déjà formalisés pour O'Connor (1993).

Cette structure montre que dans un système externe de type Sraffian en équilibre, il n'y a aucune raison de type systémique de respecter la *durabilité* du système externe vulnérable et en équilibre dans la mesure où il y une *asymétrie*[124], donc une justification pour l'exploiter pour favoriser une économie de type *durable ou circulaire*, ce qui a été le cas du rapport entre Syctom et les voisins d'Ivry. En utilisant le cadre proposé pour Moore en 2015, Syctom invites ses voisins ou leurs représentants à participer au *système de la valeur en échange* à travers un mécanisme de *Cooptation* (*co-option* en anglais) qui a été décrit au chapitre VI.

11.4.1. **Difficultés liées à la coordination des acteurs du projet**

Le système de régulation doit avoir deux facettes. La première est constituée pour un régime de gouvernance fonctionnel, structurel et formel et la deuxième est une façon de structurer la relation de production qui est plutôt subjective.

Ce système de gouvernance est perçu d'une façon différente selon la partie prenante. Le rapport des opinions et expériences sur le projet de l'usine d'Ivry Paris XIII diffèrent entre les voisins d'Ivry et les ingénieurs de Syctom :

> *" La mairie d'Ivry ne veut pas de la méthanisation : Selon le Syctom, le projet de reconstruction n'est pas encore défini, mais il prévoit de réduire les déchets entrants dans l'incinérateur de 700 000 t actuellement à 550 000 par an. Et seules 350 000 t seront incinérées. Le projet initial propose un processus de méthanisation pour les 200 000 restant. Cela consiste à faire fermenter une partie des déchets, déjà réduits en pulpe, et à récupérer les biogaz, utilisés pour l'électricité. Mais le maire d'Ivry, Philippe Bouyssou (PCF), comme son prédécesseur, s'y oppose, notamment à cause du risque d'explosion. « Ce n'est pas un mode de traitement sécurisé. Il faut reconstruire l'incinérateur, mais il n'y aura pas de méthanisation à Ivry », explique*-t-on du côté de la mairie. Le Syctom, lui, cherche une solution ou un autre site pour la méthanisation " (Source: *leParisien.fr*[125])

Le projet a été techniquement controversé par un écart toujours grandissant entre Syctom et le plan Plan B'OM proposé pour Zero Waste France :

> *" Le SYCTOM a demandé à l'association Zero Waste France de présenter le Plan B'OM (baisse des Ordures ménagères), un plan alternatif à la reconstruction de l'incinérateur d'Ivry-Paris XIII. Mais aucune discussion avec les participants du groupe de travail n'a eu lieu après cette*

[124] La notion d'*asimetrie* proposé par Jason Moore a été expliquée au chapitre VI de la thèse.

[125] Les opinions de la mairie d'Ivry sur le projet de l'usine à Ivry-Paris XVIII de SYCTOM sont disponibles sur le site : *http://www.leparisien.fr/ivry-sur-seine-94200/le-collectif-3r-s-inquiete-du-projet-final-de-l-incinerateur-d-ivry-paris-xiii-25-05-2016-5828911.php* (site consulté le 4 octobre 2016).

présentation. Aucun autre moment n'a été proposé jusque-là pour débattre plus longuement de cette alternative très concrète, ce malgré nos protestations par courrier. Les chiffres du Plan B'OM n'ont fait l'objet d'aucune confrontation sérieuse avec ceux du SYCTOM, d'aucune étude sur ses propositions, son calendrier, sur le coût de 200 millions d'euros des mesures à mettre en œuvre (à comparer avec le coût de 1,150 milliard d'euros TTC du projet du SYCTOM). Un avis d'estime a été émis : les élus du bureau du SYCTOM seraient d'accord sur les objectifs, mais le calendrier serait trop ambitieux, argument que nous n'entendons que trop souvent face à l'urgence de la pollution de l'air et du changement climatique et qui n'est tout simplement pas supportable ".

L'opinion de Dominique Pagès, riveraine de projet et membre des sentinelles :

" Quand nous avons emménagé il y a dix ans, un débat s'engageait sur l'avenir de l'usine du Syctom. J'ai pensé qu'elle ne serait pas reconstruite dans un secteur qui s'urbanise, je n'ai jamais été emballé à l'idée de vivre à côté d'un monstre pareil. Au quotidien, nous subissons les mauvaises odeurs et la poussière. Quand l'usine s'arrête en été, la table sur ma terrasse est largement moins noire. Je suis aussi préoccupé par les polluants rejetés, comme les dioxines qui peuvent être dangereuses. " (Ivry94, 2016)

11.5 Structurer les enjeux de performance

Pour mettre en œuvre l'économie circulaire, un certain nombre d'actions sont possibles. Elles s'organisent en 3 domaines et en 7 piliers[126]. Voyons tout d'abord les 3 domaines. Il s'agit d'agir sur l'offre des acteurs économiques déjà caractérisé dans la section précédente. Il s'agit ensuite d'agir sur la demande et le comportement des consommateurs. Et il s'agit enfin d'agir sur la gestion des déchets. Voyons plus en détails les enjeux pour soutenir les différents piliers de l'économie circulaire en France. Une formalisation en production jointe des 7 piliers sera présentée au chapitre XII. Ces piliers peuvent être présentés ainsi :

Économie de la fonctionnalité :

- Accompagnement des entreprises pour le développement d'offres innovantes ;
- Organisation des partenariats entre les acteurs de l'industrie, des technologies de l'information et la communication, des services, de la recherche en sciences sociales et en design ;
- Évolution des compétences des acteurs économiques et des formations pour s'adapter à ces nouveaux métiers ;
- Évaluation des impacts environnementaux des nouveaux modèles économiques au-delà des bénéfices économiques ;
- Information du consommateur sur l'impact effectif de l'économie de la fonctionnalité ;

[126] La notion de 3 domaines et en 7 piliers ont été expliquée au chapitre III de la thèse.

Ecoconception :

- Sensibilisation des entreprises à l'intérêt économique de l'écoconception - Renforcement des dispositifs de formation initiale et continue ;
- Soutien de la R&D pour favoriser l'amélioration des techniques et technologies existantes en matière d'écoconception, mais aussi sur les nouveaux modèles économiques.

Écologie industrielle et territoriale :

- Développement des collaborations interentreprises et avec les collectivités, en créant la confiance ;
- Disponibilité des compétences en ingénierie environnementale pour identifier les potentielles boucles d'écologie industrielle ;
- Passage à l'acte dans les projets de mutualisations, symbioses, synergies industrielles.

Allongement de la durée d'usage :

- Pérennisation des modèles économiques des acteurs et renforcement des capacités d'investissement pour se développer ;
- Suivi pour démontrer l'efficacité de ces modèles :
- Attractivité du secteur de la réparation auprès des jeunes - Sensibilisation des consommateurs au réemploi :
- Soutien à la recherche et l'innovation, tant pour imaginer les modèles économiques de demain, que pour le développement de nouveaux concepts (par ex. : plateformes web de recyclage collaboratif).

Consommation responsable :

- Création de nouvelles filières de consommation responsable au niveau local ;
- Sensibilisation et formation des consommateurs ;
- Utilisation du levier de la commande publique responsable.

Recyclage et valorisation des déchets :

- Renforcement de l'attractivité des métiers du recyclage pour les jeunes - Accès aux gisements ;
- Soutien de l'innovation pour développer de nouvelles technologies et modèles organisationnels et économiques.

Approvisionnement durable :

- Soutien aux produits exploités durablement et de substitution issue de ressources locales - Professionnalisation de l'industrie de l'approvisionnement durable ;
- Soutien à l'innovation et à la recherche, pour développer les nouvelles technologies d'exploitation et d'extraction durables.

11.6 Identifier des variations du modèle

Dans notre cas d'étude, l'application des principes de l'économie circulaire se traduit par deux variations qui permettent un bouclage des flux dans lequel les parcours en cycle ou en cascade sont respectés en allouant les responsabilités ou droits de bouclage des flux aux propriétaires des ressources. Cela revient à restaurer une surface de 105,40 km^2 de territoire potentiel, ce qui est particulièrement conséquent au regard des programmes d'économie circulaire de la marie de Paris. Cela devrait générer une hausse du stock des ressources, avec comme conséquence, l'augmentation de la résilience des activités humaines ainsi que leur capacité à se régénérer dans le futur.

Pour étudier le bouclage de flux en amont et aval dans le milieu rural et urbain, il nous était possible de choisir l'azote. Plus précisément, le sujet est focalisé sur l'analyse du projet de transformation du centre Ivry-Paris XIII. Le futur projet comprendrait deux unités. D'abord, une unité de valorisation énergétique (UVE) qui vise à faire baisser les rejets atmosphériques. Une unité de valorisation organique (UVO) permettrait la séparation de matière organique et le traitement de biodéchets du cycle de l'azote.

A priori, les deux unités semblent le plus indiqué compte tenu de leurs parcours urbain et rural, la possibilité de mis en place le recyclage de biodéchets, de valorisation énergétique et de baisse des rejets atmosphériques, qui ont été associés directement au processus d'eutrophisation et d'acidification d'eau déjà détaillée dans le premier chapitre de la thèse.

Cependant, certaines hypothèses sont difficilement vérifiables, en particulier la relation de valeur entre les processus économiques et les processus naturels de l'azote dans l'atmosphère et la lithosphère. La guide méthodologique du développement des stratégies régionales d'économie circulaire en France de l'ADEME servira de base à la réflexion méthodologique qui permettra d'analyser le cycle de l'azote à travers trois variations:

(A) Une variation qui considère la mise en décharge des déchets sans bouclage de flux ;

(B) Une variation qui considère l'incinération du déchet avec la génération de l'énergie ;

(C) Une variation qui considère un compostage urbain.

Une proposition préliminaire d'un système de valeur qui considère une mise en décharge ainsi que les deux variations de bouclage sont présentées ci-dessous au Chapitre XII. Ces variations ont été simulées dans le modèle de production jointe. Des systèmes de valeur et des indicateurs déjà calibrés sont présentés et discutés au Chapitre XIII.

Cependant, les résultats de cette variation du sujet, la présentation de la concertation des acteurs qui accompagnent l'institutionnalisation des dispositifs tels que le débat public autour du sujet de la reconstruction du centre Ivry-Paris XIII ne sera pas inclus.

11.7 Choix de la méthode et convention pratique particulière

Le sujet du traitement des ordures ménagères a déjà été traité par d'autres chercheurs notamment Barles (2007) étant donné le faible nombre de démarches d'écologie industrielle existantes qui formalisent les systèmes de valeur en termes économiques et physiques et la gouvernance des frontières entre la biosphère et l'économie.

Une représentation abstraite des relations entre les commodités à l'intérieur d'un système de régulation a été proposée pour Sraffa. Ce système peut être l'expression des *relations fondamentalement asymétriques* entre la biosphère et l'économie. Cette *asymétrie* dépendra d'un processus de négociation dynamique des frontières qui considère les étapes d'internalisation au système de valeur et l'externalisation des déchets et l'élargissement des frontières de l'exploitation (Moore, 2015). Cette *instrumentalisation* (Klenoid, 2017) peut être exemplifiée à travers le système de valeur exprimé pour Sraffa (Sraffa, 1960), comme l'ont proposé O'Connor et Perrings (Perrings 1987; O'Connor 1993). Dans cette approche, il existe une production conjointe de processus interdépendants au travers d'un numéraire physique comme l'azote.

Par conséquent, le choix de la méthode a été guidé par la disponibilité et la qualité des données physiques des cycles biogéochimiques à Paris. Il s'oriente sur l'analyse de trois variations de bouclage qui repose sur les trois dimensions donc les domaines biophysique, économique et institutionnel du sujet.

Les indicateurs utilisés à cet effet sont l'indicateur de flux de matières (CL) et l'indicateur d'économie circulaire (MCI) déjà présents aux chapitres IX et X.

11.8 Conclusion du Chapitre 11

L'objectif principal de ce chapitre a été d'identifier et de structurer le problème. Cette démarche se voulait systémique pour intégrer les acteurs dans un contexte et un périmètre spécifiques. Au cœur de cette méthode, nous avons placé les cas, d'une part comme moyen de structurer l'évaluation et d'autre part comme fin pour décrire les variations des bouclages de flux.

Nous avons tout d'abord constaté à Ivry-sur-Seine la discussion sociale sur la transformation du centre Ivry Paris 13 porté par SYCTOM. Cette discussion nous a inspiré pour formaliser une problématique en utilisant un cadre comportant trois dimensions d'analyse.

Nous avons ensuite proposé une brève présentation des acteurs, mais notre idée est de ne pas prendre en considération le mode gouvernance dans notre discussion théorique. Cependant, nous avons identifié les acteurs et leurs opinions confrontées à la reconstruction du centre Ivry-Paris XIII.

Toutefois, l'étude des variations de bouclage des flux que nous avons mis en ouvre, se limite à l'identification de leur flux dans un périmètre, mais ne quantifie pas tous les flux de l'azote et des autres éléments comme le phosphore en Île-de-France.

Par ailleurs, la modélisation des sept piliers de l'économie circulaire que nous avons identifié restera limitée par les hypothèses. D'un côté, les différentes contraintes thermodynamiques, dans la réalité, les limites du modèle de recyclage industriel. De l'autre, le modèle de production jointe avec rendement constant a échelle et taux de profit constant dans tous les processus du modèle. Les conditions d'élargissement de l'ensemble des cas impliquent une transition qui peut être résumée dans le cadre de Jason Moore qui a été déjà mentionné au chapitre VI de la thèse.

12. UN DIAGNOSTIC DU SYSTEME.

CE CHAPITRE S'EFFORCE DE CAPTURER LES LIENS entre les caractéristiques structurelles du système de valeur et la trajectoire de croissance durable. Ceci révèle l' importance des caractéristiques thermodynamiques et économiques d' un système dans la détermination du rôle de la croissance durable de chaque ressource vers un stade stationnaire.

Le modèle utilisé dans cette modélisation est construit par l'auteur en se basant sur le prototype d' O'Connor (1993) récemment appliqué en Bretagne par Douguet et al (2000). A la base de ce prototype, nous relions le processus de production et de consommation physique, comprenant les transformations des différents intrants ou ressources matérielles et énergétiques et aussi les échanges ou transferts entre les processus.

Ce modèle est ensuite adapté dans une structure détaillée de 4 processus et de 4 ressources. Quatre variations sont étudiées. La variation « A ou de compostage et de brûlage» montre l'impact de la croissance économique sur l'émission des déchets. Dans cette variation, nous postulons que l' économie continuera à croître d'une façon non durable. Pour mesurer les impacts potentiels d'un changement technologique, on introduit ensuite dans la simulation une variation des coefficients. Cette variation est appelée « B ou d'amélioration de compostage des déchets agricoles ». Dans la variation « B », sur l'impact du bouclage de flux sur l'environnement, les promesses de réduction des émissions des polluants sont incluses dans une économie stationnaire. Pour mesurer les impacts potentiels d'un changement technologique dans la valorisation énergétique du déchet urbain, on introduit ensuite dans la simulation une variation des coefficients. Cette variation est appelée « C ou d'amélioration de la valorisation énergétique du déchet urbain ». Dans la variation « C », un tel système de valorisation peut être modélisée via la modification des outputs pour rendre compte des progrès techniques en termes de valorisation dans l'output énergie du processus de valorisation. Finalement, pour simuler la situation de tri à la source du déchet urbain, une nouvelle politique des déchets verts est mise en application avec un changement des coefficients dans la variation « D ou de tri à la source du déchet urbain ».

Pour comparer les trajectoires des activités des processus et de dispobilite des ressources sur l'environnement à travers les différents processus, nous utiliserons la méthode de calcule du vecteur et valeur propre de la production jointe sur les résultats des simulations, en vue d'indiquer la contribution des différents processus économiques à l' évolution dans la production et la consommation des ressources sous ces différents cas d'étude.

Finalement, pour capturer l' impact de l'économie circulaire sur la production des polluants et déchets à travers les aspects de technique et de bouclage de flux, nous incluons aussi les indicateurs proposés pour la fondation Ellen MacArthur (2010) et Yifang *et al.* (2007) pour explorer les bouclages des flux du modèle.

12.1 Les systèmes de valeur dans l'economie circulaire : les quatre variations didactiques

Nous nous inspirerons et suivrons la démarche établie par O'Connor en 1993 pour explorer les systèmes de valeur des cas d'étude. Ce cadre considère un ensemble de processus et de transferts de production physique interdépendants. Il établit également huit hypothèses qui ont été explorées dans le chapitre cinq de la thèse. Nous utilisons ces hypothèses pour calculer les prix relatifs des biens d'un système de production.

A. ***Le compostage et le brûlage***

Dans cette variation, nous postulons que l' économie continuera à croître d'une façon non-durable. Pour mesurer les impacts potentiel d'un changement technologique, on introduit ensuite dans la simulation une variation des coefficient.

Cette variation decrit l'utilisation des ressources dans une structure de *cascade*, le compostage des déchets et la valorisation énergetique des autres déchets à travers d'un *boucle*. Ce parcours peut être classifié selon notre classement du chapitre 8 utilise comme : une *cascade de type 6 est avec production jointe et réversion d'entropie (matière et énergie)* ou dans le 2e cas du classement proposé pour Jason Moore présenté dans le chapitre VI. Ces systèmes sont composés de quatre processus distincts, impliquant l'usage de ressources et du déchets matériels distincts :

Processus 1 – Agriculture : Le processus rural décrit l'utilisation d'azote afin de produire le capital physique économique (végétaux) et un deuxième output (déchet)

Transfert 1-2 - Le transfert entre le processus 1 et le processus 2 peut être caractérisé comme une sortie du *capital écologique* (ressource 1) du processus 1 vers le processus 2, qui l'utilise comme un intrant

Processus 2 – Compostage : Le processus décrit l'utilisation du déchet agricole afin de régénérer le capital physique écologique : azote

Transfert 2-3 - Le transfert entre le processus 2 et le processus 3 peut être caractérisé comme une sortie du *capital économique* (ressource 3) du processus 2 vers le processus 3, qui l'utilise comme un intrant.

Processus 3 - Métabolisme urbain : Le processus décrit l'utilisation des végétaux et de l'énergie et la production du déchet

Transfert 3-4 : Le transfert entre le processus 3 et le processus 4 peut-être caractérisé comme une sortie du *déchet économique* (ressource 4) du processus 3 vers le processus 4, qui l'utilise comme un intrant.

Processus 4 - Valorisation énergétique. Le processus décrit l'utilisation de l'énergie pour de brûler le déchet urbain afin de générer un capital physique économique (énergie)

À un niveau plus général, les matrices A et B du modèle à quatre processus et quatre ressources auront donc la structure suivante :

	Matrice d'inputs (A)	Matrice d'outputs (B)
Processus 1	$[\ a_{11}\ .\ .\ .\ ]$	$[\ .\ b_{12}\ b_{13}\ .\ ]$
Processus 2	$[\ .\ a_{22}\ .\ .\ ]$	$[\ b_{21}\ .\ .\ .\ ]$
Processus 3	$[\ .\ .\ a_{33}\ a_{34}\ ]$	$[\ .\ b_{32}\ .\ .\ ]$
Processus 4	$[\ .\ a_{42}\ .\ a_{44}\ ]$	$[\ .\ .\ .\ b_{44}\ ]$

Capital naturel (azote)
Déchet économique
Bien économique (végétaux)
Bien économique (énergie)

Sous forme matricielle, les intrants A, les sorties B, le surplus π et le prix p comme (cf. chapitre V) :

$$\begin{aligned} &A_a p_a + B_a p_b + \mathrm{K} + K_a p_k)(1+\pi) = Ap_a \\ &A_b p_a + B_b p_b + \mathrm{K} + K_b p_k)(1+\pi) = Bp_b \\ &(A_k p_a + B_k p_b + \mathrm{K} + K_k p_k)(1+\pi) = Kp_k \end{aligned} \qquad (12.2.1)$$

Ce système contient un nombre de k d'équations qui déterminent les *k-1* prix et le taux de surplus π. Autrement dit : *Ap (1+*π *) = Bp s*ous contraints que surplus 1= surplus 2 = surplus 3= surplus 4=π

Comme nous pouvons le vérifier, l'unle système de valeur peut être formalise comme suit :

$$\begin{bmatrix} 2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 2 & 2 \\ 0 & 4 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_1 \\ p_2 \\ p_3 \\ p_4 \end{bmatrix} .(1+\pi) = \begin{bmatrix} 0 & 2 & 2 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_1 \\ p_2 \\ p_3 \\ p_4 \end{bmatrix}. \qquad (12.2.2)$$

Sous forme matricielle, la production et la consommation nette des ressources peuvent être présentées comme suit :

$$B - A = \begin{bmatrix} -2 & 2 & 2 & 0 \\ 1 & -2 & 0 & 0 \\ 0 & 4 & -2 & -2 \\ 0 & -4 & 0 & 2 \end{bmatrix} \qquad (12.2.3)$$

Le système proposé devrait avoir deux fonctions, d'une partie un impérative de croissance économique et d'autre partie recycler ou valoriser les déchets. Ceci nous amène, à définir le niveau d'activité (y) de chaque processus du système, en utilisant le vecteur ligne des quantités q(T) qui représenté les quantités disponibles (A) au début de chaque période (T). Le système de prix est modélisé avec un vecteur en

colonne p(T) pour les prix. La méthodologie de calcule de niveau d'activité (y), prix relatif et le taux de croissance a été expliqué au chapitre V de la thèse.

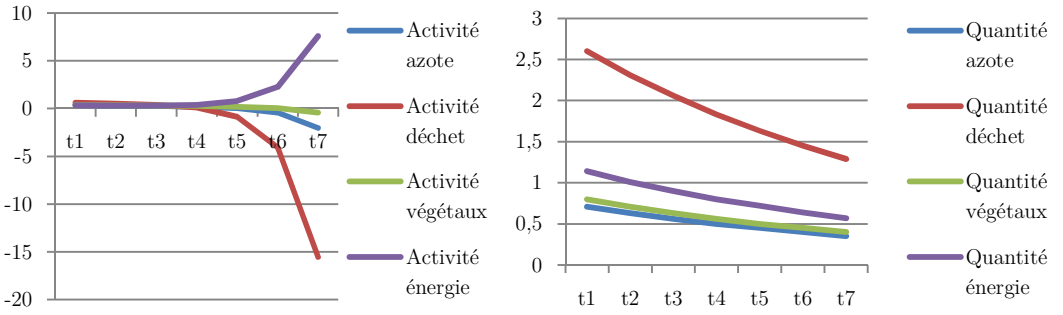
Tableau 12.2.1: Prix et activité dans la variation compostage et brûlage

Vecteur propre (Prix)				Vecteur propre gauche (activité)			
0.21	0.21	0.20	0.66	-0.31	-0.31	-0.12	0.40
0.11	0.11	0.03	0.37	0.79	0.79	-0.90	0.71
-0.64	-0.64	0.70	0.21	0.07	0.07	-0.03	0.45
0.06	0.06	-0.68	0.62	-0.14	-0.14	0.42	0.38

Source: L'auteur

Dans le cas général, la relation entre le vecteur d'activité et le type de processus est très complexe. Pour pouvoir étudier les propriétés, il convient de faire une itération graphique des vecteurs d'activité et leurs quantités de ressources.

Graphique 12.1.1 : Activité et disponibilité des ressources dans la variation compostage et brûlage



$yt_1=[0.40\ 0.71\ 0.45\ 0.38]*B*invA^{-1}$ $qt_1=[0.40\ 0.71\ 0.45\ 0.38]*B$

$yt_2=yt_1*B*A^{-1}$ $qt_2=(1+g)*qt_1$

Source: L'auteur

La résultante des vecteurs d'activité agissant en direction opposée sera toutefois différente d'une ressource à l'autre. Cela signifie qu'en partant d'un vecteur d'activité initial y_0 = [0.40 0.71 0.45 0.38], le vecteur d'activité suppose la croissance équilibre seul du premier processus dans un parcours dynamique. Cela signifie qu'aucune évolution soutenable du système ne sera possible vers un stade d'équilibre. Nous serons également en mesure d'exprimer l'évolution non durable des quantités des ressources.

B. Compostage des déchets agricoles: cas d'une économie stationnaire.

Comme nous l'avons déjà mentionné au chapitre II de la thèse, l'économie écologique s'est construite en opposition à un système antropogénique où la croissance sans fin des flux économiques et physiques menaçait de détruire l'environnement. Cette nouvelle économie plus écologique a proposé des modèles économiques plus durables en intégrant le concept d'une économie stationnaire de Kenneth E. Boulding (Boulding, 1973 ; Daly, 1991) où la consommation des ressources est maintenue constante à un niveau qui ne détruit pas l'environnement au-delà de sa capacité de régénération.

Cette structure est composé d'un stock des biens de consommation et de production et des services de renouvellement constant des ressources ou inputs, ces flux de matière et d'énergie sont reliés entre eux à travers un système thermodynamique fermé, lequel n'a pas échangé de matière, il échange par contre l'énergie avec l'environnement hors du système (Baumgartner, 1999, 2005).

L'amélioration du compostage est peut-être une solution, car on s'appuie sur l'augmentation de la production d'azote à partir des déchets, sans risque d'extinction d'azote naturel. Les déchets sont alors transformés par compostage avec un rapport carbone/azote (C/N) de 30 (1 part d'azote pour 30 parts de carbone).

Un tel compostage peut être modélisé via la modification de la matrice A pour rendre compte des progrès techniques en termes de compostage dans l'output azote du processus 2.

Le système peut être présenté au travers d'une structuration Sraffian, sous forme matricielle :

$$\begin{bmatrix} 2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 2 & 2 \\ 0 & 4 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} p_1 \\ p_2 \\ p_3 \\ p_4 \end{bmatrix} \cdot (1+\pi) = \begin{bmatrix} 0 & 2 & 2 & 0 \\ 2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_1 \\ p_2 \\ p_3 \\ p_4 \end{bmatrix}. \tag{12.2.3}$$

Sous forme matricielle, la production et la consommation nette des ressources peuvent être présentées comme suit :

$$B - A = \begin{bmatrix} -2 & 2 & 2 & 0 \\ 2 & -2 & 0 & 0 \\ 0 & 4 & -2 & -2 \\ 0 & -4 & 0 & 2 \end{bmatrix} \tag{12.2.4}$$

Nous avons évoqué dans la variation précédente la possibilité de définir le niveau d'activité (y) de chaque processus du système, en utilisant le vecteur ligne des quantités q(T) et d'obtenir le prix relatif en utilisant un vecteur en colonne p(T). Nous pouvons maintenant vérifier le taux de profit π au travers des valeurs propres du prix relatif.

$$\frac{1}{(1+\pi_1)} = -0.71 \quad \frac{1}{(1+\pi_2)} = -0.71 \quad \frac{1}{(1+\pi_3)} = 0.25 \quad \frac{1}{(1+\pi_4)} = 1$$

La valeur propre qui nous intéresse est alors celle égale à 1, ce qui signifie un taux de profit égal à zéro. Qui correspond aux vecteurs propres positives du tableau 12.2.1 droite. Il est alors possible d'avoir un vecteur propre à gauche (activité) où les 4 processus sont durablement positifs et où les quantités produites par le système restent stables :

Tableau 12.2.1: Prix et activité dans la variation d'une économie stationnaire

Vecteur propre (Prix)				Vecteur propre gauche (activité)			
0.15	-0.15	-0.18	0.41	0.47	0.47	-0.22	0.50
-0.10	-0.10	-0.05	0.41	-0.66	-0.66	-0.89	0.50
0.56	0.56	-0.71	0.00	-0.21	-0.21	-0.05	0.50
-0.08	-0.08	0.68	0.82	0.20	0.20	0.40	0.50

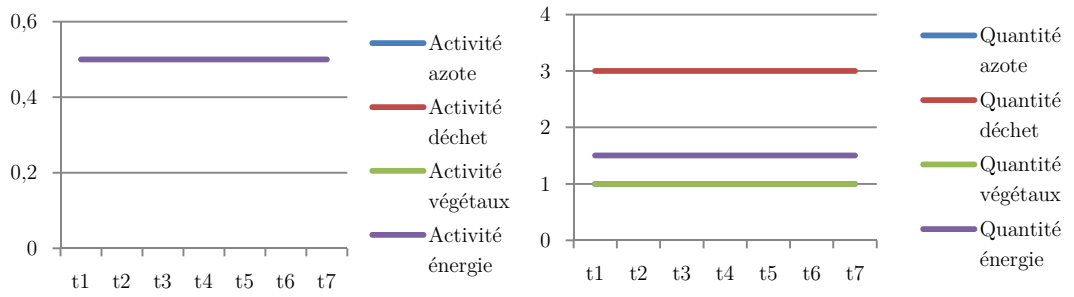
Source: L'auteur

Il peut être intéressant de noter l'existence d'un cas particulier où le vecteur propre est égal à 0.5. Il est à remarquer que la stationnarité du système dépend fortement du niveau d'activité appliqué au départ, ainsi si les niveaux d'activité initiaux yt_0 des processus sont égaux, le système devient soutenable. Dans ce système les valeurs propres sont au nombre de 4. La valeur propre qui nous intéresse est alors celle égale à 0, qui signifie un taux de croissance ou g_4 égal à 0. Qui correspond aux vecteurs propres positives du tableau 12.2.1 droite.

$$\frac{1}{(1+g_1)} = -2.04 \quad \frac{1}{(1+g_2)} = -2.04 \quad \frac{1}{(1+g_3)} = 3.08 \quad \frac{1}{(1+g_4)} = 0$$

Le graphique ci-dessous illustre l'évolution du système avec l'application du taux de profit $\boldsymbol{\pi}_4$ et le vecteur d'activité de départ suivant yt_0=[0.50 0.50 0.50 0.50].

Graphique 12.1.2 : Évolution de niveau d'activité des ressources dans une stationnarité



yt_1=[0.50 0.50 0.50 0.50]*B*A^{-1} qt_1=[0.50 0.50 0.50 0.50]*B

yt_2=yt_1*B*A^{-1} qt_2=(1+g)*qt_1

Source : L'auteur

Le graphique 12.1.2 ne montre pas de variation des quantités des ressources dans un état stationnaire. Ensuite nous allons également mettre l'accent sur deux cas de figure de bouclage de matière ou de renouvellement du capital économique et/ou écologique externe au système.

C. Amélioration de la valorisation énergétique du déchet urbain.

Nous nous proposons maintenant de proposer une amélioration technologique du processus de valorisation énergétique (cf. section 5.5). Une telle modification peut être modélisée via la modification de la matrice B pour rendre compte des progrès technique en termes de valorisation dans l'output énergie du processus 4.

Nous pouvons maintenant présenter le système sous la forme matricielle suivante :

$$\begin{bmatrix} 2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 2 & 2 \\ 0 & 4 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} p_1 \\ p_2 \\ p_3 \\ p_4 \end{bmatrix} \cdot (1+\pi) = \begin{bmatrix} 0 & 2 & 2 & 0 \\ 2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 5 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_1 \\ p_2 \\ p_3 \\ p_4 \end{bmatrix}. \tag{12.2.5}$$

La production et la consommation nette des ressources peuvent être présentées comme :

$$B - A = \begin{bmatrix} -2 & 2 & 2 & 0 \\ 2 & -2 & 0 & 0 \\ 0 & 4 & -2 & -2 \\ 0 & -4 & 0 & 4 \end{bmatrix} \tag{12.2.6}$$

Comme dans le dernier cas, nous pouvons maintenant vérifier le taux de profit π à travers de la valeur propre du prix relatif.

$$\frac{1}{(1+\pi_1)} = -0.66 \quad \frac{1}{(1+\pi_2)} = -0.66 \quad \frac{1}{(1+\pi_3)} = 0.17 \quad \frac{1}{(1+\pi_4)} = 0.84$$

La valeur propre qui nous intéresse est alors celle égale à 0.84. Qui correspond aux vecteurs propres positifs du tableau 12.2.2 droite. Il est alors possible d'avoir un vecteur d'activité où les 3 premiers processus sont durablement positifs et que les quantités produites par le système restent croissant :

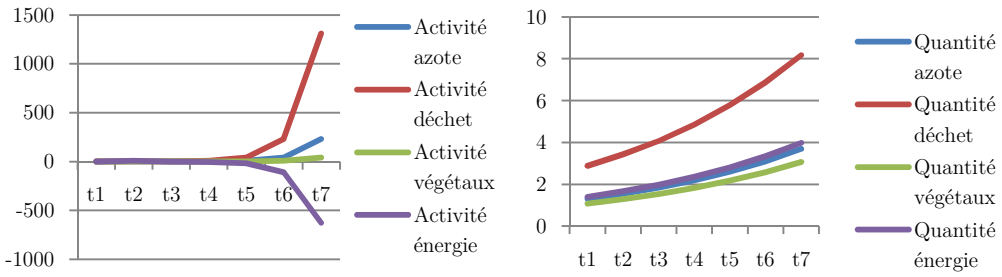
Tableau 12.2.2: Prix et activité dans l'amélioration de la valorisation énergétique

Vecteur propre (Prix)				Vecteur propre gauche (activité)			
0.12	0.12	0.13	0.58	-0.44	-0.44	0.16	0.54
0.17	0.17	0.02	0.49	0.67	0.67	0.89	0.65
-0.66	-0.66	0.71	0.21	0.12	0.12	0.03	0.45
0.04	0.04	-0.70	0.61	-0.13	-0.13	-0.43	0.28

Source: L'auteur

Le vecteur propre qui nous intéresse est alors celle égale à [0.58 0.49 0.21 0.61]. Il est à remarquer la non-stationnarité du système, le système diverge et devient non soutenable. Le graphique 12.1.3 gauche illustre l'évolution du système avec l'application du taux de profit π_4 et le vecteur d'activité de départ suivant yt_0=[0.54 0.65 0.45 0.28] donc:

Graphique 12.1.3 : Évolution de niveau d'activité des ressources dans l'amélioration de la valorisation énergétique



yt_1=[0.54 0.65 0.45 0.28]*B*A^{-1} qt_1=[0.54 0.65 0.45 0.28] *B

yt_2=yt_1*B*A^{-1} qt_2=(1+g)*qt_1

Source : L'auteur

Le graphique 12.1.3 droite, montre une augmentation des quantités de ressources utilisées grâce à la modification de la matrice *B* pour rendre compte des progrès techniques en termes de valorisation dans l'output énergie. Nous pouvons maintenant étudier sur un cas de figure qui considère un bouclage de matière à travers un tri à la source du déchet urbain.

D. Tri à la source du déchet urbain.

On pourrait se demander quel type de système de la valeur est implicitement sous-jacent au système de tri à la source. Nous commencerons pour l'examen du système de prix modifié. Ce qui vient d'être dit à ce propos autorise immédiatement une analyse plus approfondie des modifications de la matrice A pour rendre compte du développement du tri à la source des déchet organiques, avec une diminution du déchets à brûler. Le système peut être représenté comme suit :

$$\begin{bmatrix} 2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 2 & 2 \\ 0 & 2 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} p_1 \\ p_2 \\ p_3 \\ p_4 \end{bmatrix} \cdot (1+\pi) = \begin{bmatrix} 0 & 2 & 2 & 0 \\ 2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_1 \\ p_2 \\ p_3 \\ p_4 \end{bmatrix} \quad B - A = \begin{bmatrix} -2 & 2 & 2 & 0 \\ 2 & -2 & 0 & 0 \\ 0 & 4 & -2 & -2 \\ 0 & -2 & 0 & 2 \end{bmatrix} \tag{12.2.7}$$

Nous pouvons constater immédiatement la diminution de l'input déchet dans le processus 4 (valorisation énergétique) grâce au processus de tri à la source. Nous pouvons maintenant vérifier la relation entre la diminution de l'input déchet et la variation des prix relatifs.

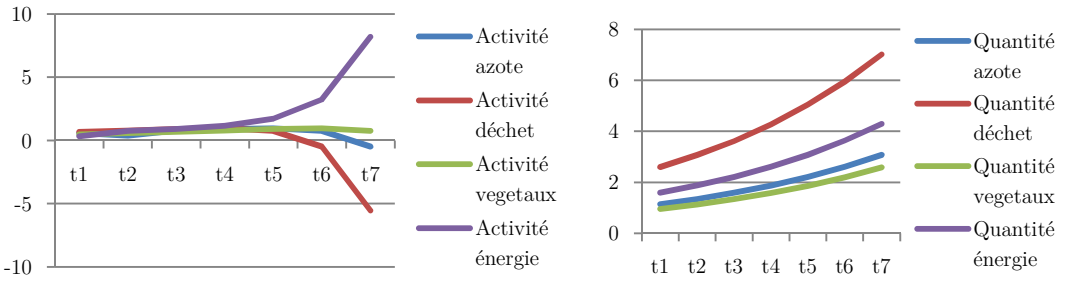
Tableau 12.2.3: Prix et activité au tri à la source du déchet urbain

Vecteur propre (Prix)				Vecteur propre gauche (activité)			
0.10	0.10	0.21	0.57	-0.42	-0.42	-0.20	0.48
0.21	0.21	0.06	0.49	0.65	0.65	-0.73	0.57
-0.69	-0.69	0.71	0.19	0.08	0.08	-0.06	0.41
0.00	0.00	-0.67	0.63	-0.17	-0.17	0.65	0.53

Source: L'auteur

Nous commencerons pour l'examen du vecteur d'activité avec des chiffres positifs donc le vecteur propre qui nous intéresse est alors celui égal à [0.48 0.57 0.41 0.53] ce qui remarque la non-stationnarité du système. Le graphique 12.1.3 gauche illustre l'évolution du système avec l'application du taux de profit π_4 et le vecteur d'activité de départ suivant yt_0=[0.54 0.65 0.45 0.28] donc:

Graphique 12.1.4 : Évolution de niveau d'activité des ressources dans l'amélioration de la valorisation énergétique



yt_1=[0.48 0.57 0.41 0.53]*B*A^{-1} qt_1=[0.48 0.57 0.41 0.53]*B

yt_2=yt_1*B*A^{-1} qt_2=(1+g)*qt_1

Source : L'auteur

Le graphique 12.1.4 gauche, montre une diminution de l'activité de l'azote grâce à la modification de la matrice *A* pour rendre compte le tri à la source. Nous pouvons maintenant d'étudier sur un cas de figure qui considère un bouclage de matière à travers un tri à la source de déchets urbains.

Il peut être intéressant de noter l'existence de variations du vecteur d'activité des ressources selon le type de changement d'input ou d'output. Nous pouvons constater que la stationnarité du système dépend fortement du niveau d'activité appliqué au départ donc si les vecteurs d'activité initiaux des processus sont différents, le système diverge et devient non soutenable.

Nous nous proposons maintenant d'étudier les quatre cas de figure en utilisant les deux indicateurs d'économie circulaire qui ont été sélectionnés aux chapitres IX et X.

12.2 Indicateur d'économie circulaire de métabolisme territorial

Dans la section précédente, nous avons fait un diagnostic sur le statut d'un système donné ou de ses différentes composantes. Dans le cas de la durabilité des matières premières, le statut renvoie au jugement que nous avons fait sur la variation des quantités et la relation de valeur des ressources. Nous pouvons maintenant vérifier que le statut du bouclage de flux de métabolisme territorial qui met l'accent sur le prélèvement de ressources accompagne des rejets importants de matières dans la biosphère. On pourrait se demander quels outils sont les plus appropriés pour évaluer le bouclage de flux de métabolisme territorial ? Nous pouvons proposer deux outils déjà explorés et validés dans les chapitres IX et X pour analyser les quatre cas comme suit :

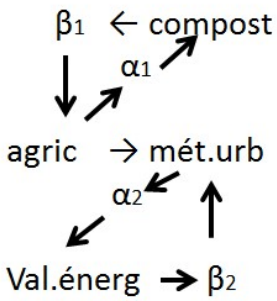
A. Indicateur de bouclage d'Yifang (CL)

Dans le cas général, l'outil proposé par Yifang *et al.* (2007) mesure directement un bouclage de flux de matière et d'énergie explicitement parce qu'ils considèrent un processus qui fait la reversion comme : le compostage ou la valorisation énergétique dans un flux en *cascade*. Cet outil utilise un indicateur de bouclage β qui permet de mesurer le bouclage. Donc une valeur de CL=1 indique un haut développement systémique d'économie circulaire.

Supposons la valorisation énergétique de la ressource 2 (déchet) au travers d'un processus économique comme la *valorisation ou brûlage des déchets* dont la fonction est de produire un capital économique (ressource 4, l'énergie), en utilisant un déchet économique (ressource 2). Pour compléter le bouclage des flux, nous supposons le bouclage de certains flux de la production agricole dans le processus 2 comme l'utilisation du déchet végétal comme les légumineuses dans la préparation du sol avec l'incorporation d'azote des tissus végétaux.

Le cadre des indicateurs proposés pour Yifang permet de mesurer la circularité des processus en utilisant les prix déjà calculés et l'indicateur de circularité CL de Yifang, il peut être intéressant de noter que cet indicateur utilise le prix relatif dans la méthode de calcul. La figure 9.5 montre ensuite le circuit des flux de matière et d'énergie qui peut être mesuré en utilisant α et β comme les ratios qui indiquent la circularité du système (voir figure suivante).

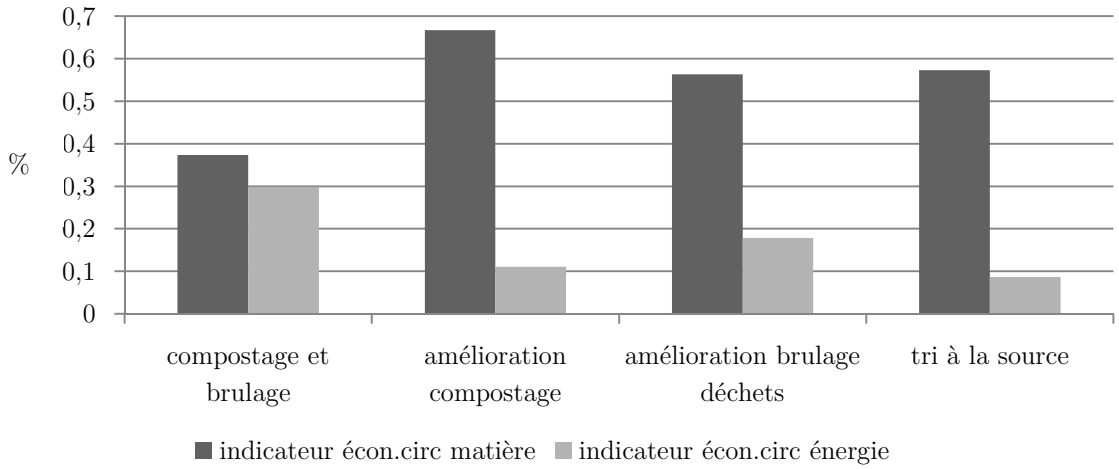
Figure 9.5 : Bouclage de flux de l'indicateur d'Yifang (CL).



Source : L'auteur

La valeur de *CL* doit être comprise entre 0 et 1. La valeur 0% représenté une boucle ouverte, nous pouvons trouver plus de renseignement en annexe XII.C.

Graphique 12.2.1 : Indicateur *CL* de bouclage de flux.



Source : L'auteur

La lecture du graphique apelle quelques commentaires. Tout d'abord nous pouvons affirmer que : 1) La barre du deuxième cas donne le pourcentage le plus élevé dans le bouclage de la matière. La signification de ce résultat est assez évidente, car il s'appuie sur l'augmentation de la production d'azote à partir des déchets via la modification de la matrice A pour rendre compte des progrès techniques en termes de compostage dans l'output azote du processus 2, sans risque d'extinction d'azote naturel dans un état stationnaire. Les déchets sont alors transformés par compostage avec un rapport carbone/azote (C/N) de 30 (1 part d'azote pour 30 parts de carbone); 2) Les barres qui représentent les troisième et quatrième cas donnent des pourcentages similaires dans le bouclage matériel, il s'agit de processus qu'ils ne sont pas dans un état stationnaire donc ils sont en train de faire une réversion plus petit que le deuxième cas (amélioration compostage); 3) Les barres qui représentent les troisième et quatrième cas donnent résultats controversés dans le bouclage énergétique. La signification des résultats est intéressante, car il s'appuie sur une amélioration technologique du processus de valorisation énergétique. Une telle modification peut être modélisée via la modification de la matrice B pour rendre compte des progrès technique en termes de valorisation dans l'output énergie du processus 4. Mais le système qui a été présenté dans le quatrième cas n'est peut-être pas capable sur le champ thermodynamique d'utiliser toute l'énergie produite donc il a produit 5 unités d'énergie (cf. les *outputs* dans la quatrième ligne du système 12.2.5) et en consomme seulement 2. On constate une perte de 3 unités, l'énergie etant difficilement stockable. En conséquence, le premier cas représente un système plus circulaire que le troisième système dans le domaine énergétique.

B. Le *Material Circularity Indicator (MCI)* de la fondation Ellen MacArthur

La question que l'on peut se poser à ce stade est de savoir quel autre indicateur permettra de mesurer une réversion dans un système. C'est dans ce sens que le *Material Circularity Indicator (MCI),* proposé pour la fondation Ellen MacArthur, pourrait capter certains flux de la production agricole et du métabolisme urbain comme l'utilisation du déchet végétal. L'indicateur de flux linéaire *LFI* mesure la quantité de matériaux qui parcourent un flux linéaire, nous pouvons trouver plus de renseignement du calcule de l'indicateur *LFI* en annexe XII.D.

L'index du *MCI* ou indicateur d'économie circulaire a été construit à partir du *LFI* multiplié par un facteur X de taux de profit du cycle de vie du produit, il peut être intéressant de noter que cet indicateur n'utilise pas le prix relatif dans la méthode de calcul.

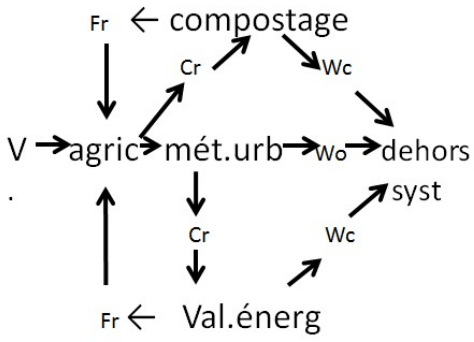
$$MCI = 1 - LFI \cdot F(X)$$

La valeur du *MCI* doit être comprise entre 0 et 1. La valeur 1 ou 100% sont représente par une boucle fermée, nous pouvons trouver plus de renseignement en annexe XII.D. Il peut être utile de donner une illustration de la procédure algébrique conduisant à la détermination du LFI comme suit :

$$LFI = \frac{V + W}{2M + \frac{W_F - W_C}{2}}$$

Nous serons également en mesure de montrer les flux des V, W, W_f et W_c comme suit :

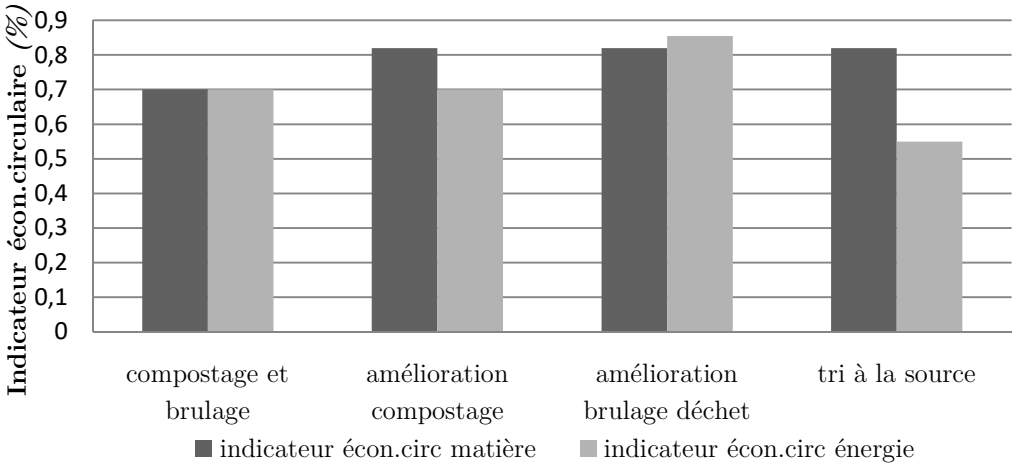
Figure 9.6 : Bouclage de flux de l'indicateur de la fondation Ellen MacArthur (*MCI*).



Source : L'auteur

Nous pouvons maintenant vérifier la valeur du *MCI* pour les quatre cas qui ont été déjà évalués par l'indicateur d'Yifang.

Graphique 12.2.2 : Indicateur du MCI (%) de bouclage de flux.



Source : L'auteur

La lecture du graphique apelle qui les deuxième, troisième et quatrième colonnes donnent le pourcentage le plus élevé dans le bouclage de la matière. Elles portent sur un système qui à été modifié pour avoir une réversion. Il peut être intéressant de noter que cet indicateur n'utilise pas le prix relatif dans la méthode de calcul donc on n'observe aucune connexion directe entre le système de prix et la circularité dans les résultats. Considérons pour terminer, la troisième colonne qui donne le pourcentage le plus élevé dans le bouclage de l'énergie, la signification des résultats est directe, car elle s'appuie sur une amélioration technologique du processus de valorisation énergétique (brûlage d'énergie) avec l'absence de système de la valeur comme dans l'indicateur d'Yifang (CL), lequel parfois modifie la valeur de l'indicateur de bouclage.

12.3 Actions identifiées pour les acteurs de la gouvernance

Nous avons évoqué dans les sections précédentes la possibilité d'un bouclage dans l'économie circulaire, nous nous proposons maintenant d'étudier les autres boucles proposées par les sept piliers de l'ADEME, qui ont été détaillées à chapitre III, et qui peuvent être formalisées en utilisant notre cadre de production jointe, exprimé aux chapitres V et VII.

Une telle analyse peut être modélisée via la modification de la matrice A et B pour rendre compte des progrès techniques (cf. section 5.5) en termes d'approvisionnement durable, écoconception, EIT, économie de la fonctionnalité, consommation responsable, allongement durée vie et recyclage et valorisation.

Les nouveaux vecteurs lignes peuvent être présentés au travers d'une structuration Sraffian, comme suit :

- **Approvisionnement durable** : Extraire des ressources en prenant en compte la hiérarchie de ces ressources. Il s'agit dans notre cas d'améliorer l'approvisionnement de l'azote notamment dans le cas des entreprises et des collectivités locales et territoriales.

  Processus d'amélioration du mode d'exploitation/extraction d'azote.

	Azote	végétaux	travail	déchet
A= [	3	0	1.34	0]

	Azote	vég	tra	déchet
B= [	10	0	0	0]
B-A= [	7	0	-1.34	0]

  Nous pouvons observer ci-dessous la production et la consommation nettes de 0 unité des végétaux et des déchets. Ce cas de figure correspond au processus de fixation[127] de l'azote atmosphérique vers ammoniac déjà détaillé au chapitre I de la thèse. Ce type de processus utilise de l'azote atmosphérique et la force de travail pour produire de l'azote sous la forme de nitrate. Il peut être trouvé au deuxième cas du tableau 6.3.2 du cadre de Jason Moore présenté dans le chapitre VI.

- **Écoconception :** Il s'agit de concevoir en prenant en compte l'ensemble des impacts environnementaux et en particulier la consommation des ressources et notamment des matières premières, elle porte aussi bien sur les produits que sur les procédés et dans notre cas porte sur l'amélioration du processus à travers un changement de technologie.

  Processus de production d'azote (augmentation de la technologie)

	Azote	végétaux	travail	déchet
A=[	5	0	1.34	0]

	Azote	vég	tra	déchet
B= [	13.6	0	0	0]
B-A= [	8.6	0	-1.34	0]

  Le vecteur B-A a présente la consommation nette de la force de travail (8.6) et une augmentation dans la production de l'azote (8.6) par rapport à l'exemple d' approvisionnement durable qui a été possible au travers d'un changement de technologie.

[127] Le procédé Haber-Bosch permet par utilisation directe de l'azote de l'air de produire de l'ammoniac, cet ammoniac sert ensuite à fabriquer des engrais.

- **Économie industrielle et territoriale (EIT) :** C'est-à-dire la capacité des acteurs à pouvoir travailler ensemble et qui les conduira à des symbioses industrielles et à faire que les déchets des uns ou l'énergie fatale des uns deviennent des ressources pour les autres.

Processus du métabolisme urbain (Utilisation collective des ressources)

	Azote	végétaux	travail	déchet
A =	[0	3	1.34	1]

	Azote	vég	tra	déchet
B=[	0	0	5.36	2]
B-A= [	0	-3	4.02	1]

Nous pouvons observer ci-dessus la production nette de 1 unité du déchet qui sera utilisée comme un intrant d'autre processus, l'alimentation de la force travail qui devra être reconstituée dans un processus similaire au processus proposé par Marx (1867) qui a déjà été présenté dans le tableau 12.1.1. Le vecteur B-A à présenté une consommation nette de 3 végétaux sous la forme de nourriture qui permet la reconstitution de la force travail dans le processus de métabolisme urbain. Il peut être trouvé au deuxième cas du proposé par Jason Moore (tableau 6.3.2 présenté dans le chapitre VI et en annexe XIII.D).

- **Économie de la fonctionnalité :** Il s'agit de passer, de la vente d'un bien, à la vente de l'usage de ce bien, mais également dans notre cas d'améliorer le processus de production où l'entreprise reste propriétaire de ses biens et en vend l'usage au travers d'unités qui y sont propres. De critiques son adressées sur le système d'emballage et de vente d'azote et d'autres intrants agricoles comme les produits phytosanitaires parce que ces emballages et solvants sont parfois très toxiques, c'est-à-dire qu'ils sont difficilement éliminables par la nature. Ce type de processus consiste à fournir des emballages d'azote (nitrate de potassium) et des bidons de produits phytosanitaires et à reprendre les bidons et emballages sales sous la forme d'un déchet en B = 0.2 pour les recycler dans un processus externe similaire au processus déjà exprimé au deuxième cas du proposé par Jason Moore (tableau 6.3.2 présenté dans le chapitre VI et en annexe XIII.D).

Processus agricole (vente de l'usage de l'azote)

	Azote	végétaux	travail	déchet
A= [	10	0	1.34	0]

	Azote	vég	tra	déchet
B= [	0	10	0	0.2]
B-A=[	-10	10	-1.34	-0,2]

Le vecteur B-A a présenté la consommation nette de la force de travail (1.34) et d'azote (10) pour produire des végétaux (10) et des déchets sous la forme des bidons et des emballages égaux à (0.2).

- **Consommation responsable :** Il s'agit de l'acquisition de biens et services, leur usage et leur rejet contribue à un certain nombre d'impacts écologiques, ces impacts dépendent directement des pratiques de consommation. Mais ces impacts dépendent également de la façon dont sont produits les biens consommés et dont sont gérés les déchets générés et dans notre cas porte sur diminution de la consommation des marchandises du métabolisme urbain.

  Processus du métabolisme urbain (diminution de la consommation des marchandises)

	Azote	végétaux	travail	déchet		Azote	vég	tra	déchet
A=	[0	3.8	1.34	1]	B=	[0	0	5.36	4.6]
					B-A=	[0	-4.8	4.02	4.6]

  Nous pouvons observer ci-dessus la production nette de 4.6 unités des déchets qui seront utilisés comme des intrants d'autre processus, l'alimentation de la force travail que devra être reconstituée dans un processus similaire au processus proposé par Marx qui a déjà été présenté dans le tableau 6.3.2 proposé par Jason Moore (tableau 6.3.2 présenté dans le chapitre VI et en annexe XIII.D). Ce type de processus d'alimentation est caractérisé par un achat responsable.

- **Allongement durée vie :** Cet allongement de la durée d'usage, passe par le réemploi des produits et bien entendu le don ou la vente de produits comme les végétaux.

  Processus du métabolisme urbain (reconsommation des végétaux)

	Azote	végétaux	travail	déchet		Azote	vég	tra	déchet
A=	[0	4.8	1.34	0]	B=	[0	2	5.36	2,6]
					B-A=	[0	-2.8	4.02	2.6]

  Le vecteur B-A a présenté la consommation nette de 2.8 végétaux, il reste donc 2 végétaux qui seront consommés pour d'autres personnes (supermarché solidaire). Ce type de processus qui utilise de la force de travail (4.02) et produit des déchets (2.6).

- **Recyclage et valorisation :** Cette symbiose industrielle consiste à passer d'un mode de production linéaire. Il considère un flux de matières premières comme l'azote et l'énergie en entrée et un flux des biens, des déchets et de l'énergie en sortie. Les unités de production sont interconnectées.

  Processus de production agricole en utilisant l'intégration des déchets verts ou compost au sol pour augmenter la minéralisation.

	Azote	végétaux	travail	déchet	énergie		Azote	vég	tra	déchet	énergie
A=	[13	0	1.34	0.6	5]	B=	[0	10	0	0.1	2]
						B-A=	[-13	10	-1.34	-0.5	-3]

Le vecteur B-A a présenté la consommation nette de 13 unités d'azote, et de 1.34 unité de la force de travail. Ce type de processus qui utilise 0.6 unité de déchets verts ou compost comme des intrants pour produire les 10 végétaux. Un processus externe similaire au processus déjà exprimé dans le troisième cas du tableau 6.3.2 proposé par Jason Moore (voir le chapitre VI et en annexe XIII.D).

Processus de valorisation énergétique, ce type de processus va permet de fournir de l'énergie sous la forme d'électricité ou de chaleur à d'autres processus tels que l'agriculture.

	Azote	végétaux	travail	déchet	énergie
A= [	0	0	1.34	0.5	5]

	Azote	vég	tra	déchet	énergie
B= [	0	0	0	0.1	25]
B-A= [	0	0	-1.34	-0.4	-20]

Nous pouvons observer ci-dessus la production de 25 unités d'énergie qui seront utilisées comme des intrants et d'autres processus en utilisant comme intrants 0.5 unité des déchets du métabolisme urbain. Ce type de processus a déjà été présenté dans le tableau 6.3.2 proposé par Jason Moore (voir chapitre VI et en annexe XIII.D).

Après la formalisation de cet inventaire des piliers, une dernière phase à pourrait être lancée à titre d'exemple pour répondre aux enjeux prioritaires du bouclage de flux du chapitre XIII, il conviendra d'identifier un nombre restreint d'enjeux spécifiques pour chaque pilier. En ce sens, nous avons identifié quatre piliers (voir ci-dessous) spécifiques qui ont été proposés par les groupes de travail du *Livre blanc de l'économie circulaire du Grand Paris*, qui sont en rapport avec le cycle de l'azote et avec les piliers proposés par l'ADEME. Il s'agit de *l'approvisionnement, de l'économie industrielle et territoriale (EIT), de la consommation, du recyclage et de la valorisation.*

1. Alimentation, de l'agriculture urbaine aux biodéchet

A. Valoriser les invendus et les déchets alimentaires sur les marchés municipaux.
B. Développer les productions agricoles ou énergétiques sur sols pollués.
C. Prévenir et valoriser les biodéchets de la restauration collective.

2. Aménagement, de l'écoconception au chantier vert

D. Développer et stimuler le maillage territorial pour optimiser le réemploi et la valorisation des matériaux à l'échelle locale.
E. Introduire et donner du poids aux clauses d'économie circulaire dans les marchés publics.

3. Valorisation des énergies de récupération

F. Recenser les données et outils existants sur les énergies renouvelables et de récupération.
G. Sensibiliser les citoyens sur les énergies de récupération.
H. Mettre en œuvre des mécanismes économiques incitatifs spécifiques aux énergies de récupération

4. Écologie industrielle et territoriale

I. Moduler et territorialiser progressivement la TGAP en rendant de plus en plus dissuasifs le stockage et l'incinération des déchets

Les actions qui permettent la mise en pratique des propositions des groupes de travail du Livre blanc de l'économie circulaire du Grand Paris sont montrées ci-dessous :

	Processus du cycle de l'azote à Paris				
Piliers de l'économie circulaire	Production d'engrais	Agriculture	Alimentation	Traitement déchet	Valorisation déchet
Approvisionnement	E	D			
EIT	E	B-E	I	E-I	B-E-D-F-H
Consommation		E	C-E-I	I	C
Recyclage et valorisation		A-F	G	A-F	F-G-H

12.4 La mise en place du changement de cas d'étude : Le rapport des forces économiques sur les frontières de gouvernance.

Par ailleurs, il convient de clarifier le rôle des différents acteurs économiques qui utilisent le cadre institutionnel pour articuler le passage vers une logique vertueuse.

Par ailleurs, la fédération des entreprises d'insertion d'Île-de-France propose une cartographie des entreprises[128] pour soutenir les enjeux spécifiques des piliers sélectionnés. Le bouclage de matière peut être réussite en utilisant des entreprises du pilier *d'alimentation, de l'agriculture urbaine aux biodéchets* dont :

A. BIO YVELINES SERVICES (recyclage et récupération du déchets verts).
B. CNIM INSERTION (traitement du déchets).
C. REBOND INSERTTION-SUEZ (Tri et collecte sélective de papier, carton…)
D. REVIVRE (collecter et réemploi des produits alimentaires en faire bénéficier des populations défavorisées).

La transition vers un bouclage de l'énergie considéré un processus économique du pilier de la *valorisation des énergies de récupération* comme :

E. ENERGIES 9 (collecte déchets organiques auprès de lieux de restauration collective. Livraison jusqu'à l'usine de méthanisation puis rachat et revalorisation par ERDF.
F. SYCTOM (collecte et valorisation des déchets urbains).

[128] Une cartographie des entreprises pour soutenir les enjeux spécifiques de l'économie circulaire peut été trouvée en : *https://issuu.com/catherine077/docs/economie_circulaire* (site consulté le 1 juin 2016).

Il est également important de compléter cette articulation avec les autres piliers comme :

Aménagement, de l'écoconception au chantier vert dont :

G. REGIE DE QUARTIER PORTES DE L'ESSONE (développer et stimuler le maillage territorial pour optimiser le réemploi et la valorisation des matériaux à l'échelle locale).

Écologie industrielle et territoriale dont :

H. CLAIR ET NET (tri sélectif en interne et chez les clients, logique de grandes proximités s'affectent à pied et l'ecoproprète).

La question du financement mérite également une place importante dans la réflexion politique. Il faut une réorganisation du système de prix est nécessaire plutôt qu'une définition de ligne budgétaire orientée vers le changement de scénario.

Dans cette perspective, le coût de l'exploitation des ressources naturelles doit être plus cher que celui du recyclage, de la réutilisation et de la valorisation des déchets. Le système de prix est réorganisé comme suit (Lévy, 2009):

- L'État réalise une planification des ressources naturelles et notamment minérales.
- Il faut postuler pour obtenir le droit d'exploitation et le droit ou devoir de traitement des déchets.
- Les entreprises qui exploitent les ressources doivent payer l'impôt sur les ressources et être imposées selon un montant de compensation.

La mise en œuvre des mécanismes d'utilisation payante et de droits de propriété des ressources sont des mesures favorable aux entreprises, mais il convient de rester vigilant, de bien encadrer ce droit pour éviter la tragédie des biens communs (Hardin, 1968).

12.5 Mise en place pratique du changement de scénario

Premier échelon : le passage vers un bouclage de flux matériels

Le passage vers un scénario de bouclage de matière peut être réussit en faisant appel à une entreprise de recyclage et de récupération de déchets verts comme BIO YVELINES SERVICES.

Supposons comme dans le chapitre VIII que le processus économique 2 (dont fait partie l'agriculture) utilise directement une partie de la ressource 4 (déchet végétal urbain) comme input de la production de la ressource 2 (végétaux).

Par exemple, l'entreprise BIO YVELINES SERVICES doit traiter 0.3 kg d'azote/pers/ans dont 3.7 tonnes d'azote/année[129]. Cela représente 36.63 tonnes de déchets à traiter chaque année. Le rapport des entreprises d'insertion en Île-de-France en 2015 indique que BIO YVELINES SERVICES s'attendait à traiter 24.000 tons/ans des déchets verts en 2014, l'azote représentant 0.15% des déchets recyclés par ans.

Deuxième échelon : le passage vers un bouclage de flux énergétique

La transition vers un bouclage d'énergie considérée un processus économique (valorisation des déchets) en utilisant la ville comme *fond*, il s'agit de produire un capital économique (ressource 5, l'énergie) de 25 Watts-heures (Wh) /pers/ans. Il s'agit de produire :

12.500.000 habitants x 25 kWh/pers/ans = 312.500.000 par habitants d'Île-de-France.

2.229.621 habitants x 25 kWh/pers/ans = 55.740.525 kWh ou 55.740 MWh par Parisiens.

Cette transition vers le bouclage de l'énergie à Paris peut être gérée par l'agence métropolitaine des déchets ménagers (SYCTOM) :

- L'usine de SYCTOM à Saint-Ouen de que produisent 65.000 mégawattheures (MWh) chaque an grâce à des déchets traités dans le centre. Cette usine traite chaque année 630.000 tonnes du déchets ménagers produits par 1.300.000 habitants dans 18 communes et 4 arrondissements parisiens.
- L'usine de SYCTOM à Ivry -Paris XVIII produit une chaleur dégagée par la combustion des déchets, est récupérée et transformée en énergie. Une partie de l'électricité est utilisée pour le fonctionnement du centre lui-même. Cette usine traite chaque an 770 000 tonnes du déchets par an, dont 730.000 tonnes de déchets ménagers par valorisation énergétique (125 000 (MWh)[130]. L'usine produit de la vapeur qui est vendue à la CPCU (Compagnie parisienne de Chauffage urbain), permettant ainsi de chauffer plus de 100 000 équivalents-logement chaque an (SYCTOM, 2006).

12.6 Conclusion du Chapitre 12

Dans notre étude, l'usage de production jointe permet de donner un cadre formel dans l'analyse et les réflexions sur le flux de matière et d'énergie dans le cycle de l'azote et les systèmes de valeur associés à ce flux. On peut choisir de représenter tout de même les flux de l'azote et des autres ressources écologiques, mais cela suppose alors cela signifie qu'un prix leur soit attribué ? Que signifie ce prix? Si les ressources écologiques ne sont pas produites, et servent donc d'apport extérieur pour le système

[129] Ile-de-France produit 3.750.000 Kg d'azote/ans =0.3 kg x 12.500.000 habitants, Il s'agit de 36.63 tonne du déchet dont 9.9 (kg/tonne de compost) x 3.7 (tonne d'azote dans le déchet). La quantité d'azote au déchet a été trouvé en : *http://www.cas-asso.com/uploads/rte/File/DossiersPresse/Les%20sols%20vivants%20Bio/15D%C3%A9chets_verts.pdf* (site consulté le 10 juin 2016).

[130] Les informations sur quantité du déchet traite par l'usine à Ivry-Paris XVIII de SYCTOM sont disponibles sur le site : *http://projet-ivryparis13.syctom.fr/le-projet/le-centre-actuel/* (site consulté le 10 juin 2016).

économique, le prix correspond à une rente, c'est-à-dire à un prélèvement du surplus en faveur du possesseur de la ressource écologique. Si les ressources écologiques sont produites, le prix incorporera les échanges nécessaires à la reproduction du système et s'il y a un taux de profit positif, il incorporera aussi la valeur d'une part du surplus.

Afin de répondre à cette question, nous avons exploré plusieurs points :

- Premièrement, nous avons proposé des systèmes de valeur. La variation « A » ou de compostage et de brulage» montre l'impact de la croissance économique sur l'émission des déchets. Dans cette variation, nous postulons que l' économie continuera à croître d'une façon non durable. Ensuite la variation « B » représente l'impact du bouclage de flux sur l'environnement, les promesses de réduction des émissions des polluants sont incluses dans une économie stationnaire. Nous avons ensuite introduit un changement technologique dans la valorisation énergétique du déchet urbain, cette variation est appelée « C ». Finalement, pour simuler la situation de tri à la source de déchet urbain, nous avons proposé un changement des coefficients dans la variation « D» ou « de tri à la source du déchet urbain ». Nous pouvons constater que la stationnarité du système dépend fortement du niveau d'activité appliqué au départ donc si les vecteurs d'activité initiaux des processus sont différents, le système diverge et devient non soutenable.

  Il serait donc très utile de débattre : pourquoi le système diverge et devient non soutenable ? La réponse peut être dans la propriété des ressources, un système vivant apparait dépendant de l'énergie solaire : cependant, cette hypothèse ne peut être validée que si un modèle physique explique précisément comment l'énergie solaire sert à la régénération des plantes et des herbivores. Peut-on dériver de ce système, un système de valeur? Dans le cadre Sraffian, les biens et services écologiques du système économique sont possédés par un individu qui va les échanger sur un marché avec d'autres marchandises (on peut trouver plus de renseignement en annexe XII.E du chapitre XII). Si les ressources écologiques ne sont possédées par personne on pourrait alors se demander pourquoi quelqu'un dois payer un prix pour l'usage de ces ressources, néanmoins, les déchets et les polluants ne sont pas représentés dans le système économique, parce que ce ne sont pas des marchandises. Par contre, les services de dépollutions, de recyclage ou de traitement des déchets peuvent être introduits dans le système.

- Deuxièmement, nous nous sommes proposé d'étudier le bouclage de flux en utilisant deux outils. Nous avons constaté à travers l'indicateur Yifang que le cas d'amélioration du compostage donne le pourcentage le plus élevé dans le bouclage de la matière. La signification de ce résultat est assez évidente, car il s'appuie sur la modification de la matrice A pour rendre compte des progrès techniques dans un état stationnaire.On peut remarquer les résultats par l'indicateur d'Ellen MacArthur dans les variations B, C et D, qui portent sur un système qui a été modifié pour avoir une réversion. Ils donnent le pourcentage le plus élevé dans le bouclage de la matière. On n'observe aucune connexion directe entre le système de prix et la circularité dans les résultats.

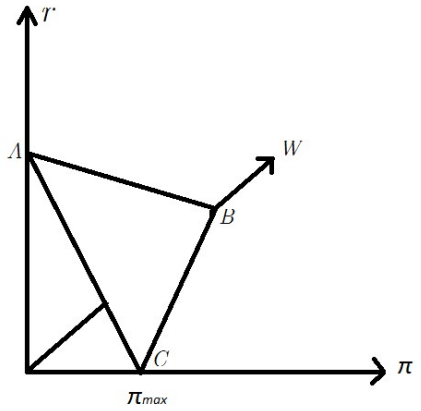
- Troisièmement, nous avons étudié et formalisé à travers de la production jointe, les autres boucles proposées par les sept piliers de l'ADEME. Ensuite nous avons identifié quatre piliers spécifiques qui peuvent être pertinents dans notre étude. Finalement on a proposé des exemples vers un bouclage de flux de matière et de l'énergie.

Le chapitre XIII est consacré à une étude des trois variations du système de valeur et de leurs indicateurs de mesure de circularité.

13. PRESENTATION DES RESULTATS : SYSTEMES DE VALEUR ET APPROPRIATION DU CAPITAL URBAIN

NOUS NOUS PROPOSONS MAINTENANT D'ETUDIER UN PROBLEME PARTICULIER: le métabolisme urbain qui produit un polluant nuisible pour la santé humaine avec une obligation de paiement pour s'en débarrasser. Ainsi, nous devons nous poser la question : comment représenter cette transaction ? Cette transaction peut être représenté à travers de l'arbitrage entre le taux de retour sur la nature (r), le taux de retour sur force de travail (w) et le taux de retour sur l'économie capitaliste (π).

Figure 9.7 : L'arbitrage entre retour sur la nature (r), retour sur force de travail (w) et retour sur l'économie capitaliste (π)



Source L'auteur

On observera que dans le point C de la figure, où $\pi=\pi_{max,}$ r=0 et w=0, tout le surplus du système sera restitué vers le propriétaire de l'économie. Alternativement, nous pouvons déposer tout le retour dans la force de travail (w) avec le point B où π =0 et r=0, on obtient ainsi un système de valeur similaire à la théorie de la valeur-travail[131] (cf. section 5.1.1). En outre, on peut déposer toute la valeur dans la terre comme une ressource naturelle ou un service écologique, on obtient un système de prix relatifs avec le point A où π =0 et w=0, ce qui correspond à la théorie de la valeur-nature.

Nous pouvons maintenant vérifier en utilisant la théorie sraffianne que cet arbitrage est fondamentalement politique. Donc nous pouvons trouver les physiocrates dans le point A, en B la théorie marxiste et en C les néoclassiques qui ramènent tout surplus vers un retour sur le capital économique.

[131] Précisons que le surplus ne doit pas comporter les biens basiques qui permettent aux travailleurs de reproduire leur force de travail, sinon dans les 2 autres cas (C et A) le système ne pourra pas continuer la période suivante.

Les néoclassiques[132] veulent intégrer et instrumentaliser toutes les formes du capital donc économique, humain et naturel dans le système capitaliste.

Nous pouvons constater immédiatement que cet arbitrage représente le triangle de la figure 9.7 et correspond à l'expression des *relations fondamentalement asymétriques* entretenus par le système capitaliste entre la biosphère et l'économie.

Ces relations peuvent être représentées en termes des variations des quatre ressources primaires ou *4cheaps*. En ce sens, nous devrions trouver les variations des *4cheaps* proposées par le classement de Moore (2015) dans le chapitre VI dans notre terrain d'étude.

L'évaluation des régulations des frontières nous confronte au développement non pas du capitalisme et de la nature, mais du capitalisme dans la nature.

Ce système de régulation est une expression du fonctionnement d'un sous-ensemble des sociétés humaines. D'après une définition allongée d'*oikeios* (Moore, 2015), le système est composé des multiples écosystèmes en partant du centre vers la périphérie (Wallerstein, 1974) (cf. section 6.3.4). Les hommes dans le centre en tant qu'ils utilisent sans cesse leur propre environnement, produisent en même temps leurs propres structures de pouvoir, de gouvernance sur les frontières.

Pour exprimer les relations dans les *frontières,* nous pouvons revenir vers la vision de Braudel et de Wallerstein pour expliquer cette structure du centre et de la périphérie (annexe VII.A).

Dans ce contexte, les variations des *frontières* peuvent être formalisées en utilisant les trois variations proposées par la thèse qui permettent de caractériser les variations de *4cheaps* dans un cadre de production jointe (annexe XIII.D).

Considérons, pour commencer, le cas (*première variation du sujet*) qui considère qu'une mise en décharge des déchets peut être caractérisée comme une prédation pure, et où la reproduction du travail est autonome par rapport à la circulation du capital (cf. chapitre VI) dans un *fond* externe. Cette variation utilise de matière première, des aliments et de la force de travail pour se débarrasser des déchets, sans production d'énergie.

Il peut être intéressant de noter l'existence d'un cas pour lequel la mise en décharge du déchets *disparait*. Cette variation considère l'utilisation de matière première, aliment, force de travail, et énergie dont les *4cheaps* pour produire des marchandises et traiter ou valoriser les déchets. Ce bouclage de l'énergie peut être présent à travers des secteurs de production et de consommation interne comme l'agriculture et le métabolisme urbain, un secteur de valorisation énergétique interne et un secteur de reproduction externe du *fond,* d'ici le travail.

[132] Les néoclassiques veulent intégrer et *instrumentaliser* tout. Ils définissent le surplus comme du profit, qui revient donc aux entrepreneurs : si nous sommes en rendements constants, il n'y a pas de surplus (chacun reçoit exactement la valeur du bien qu'il donne), mais si nous sommes en rendements décroissants il y a un surplus (car toutes les unités d'un même bien sont vendues au même prix, donc les premières unités produites à meilleur coût sont vendues au prix fort).

De là, on pourrait se demander quel type de prédation est implicitement sous-jacent à l' incinération du déchet. Considérons le deuxième cas (*deuxième variation du sujet*) où il y a un bouclage de flux de matière présente, le deuxième cas de l'annexe XIII.D, avec des secteurs de production et de consommation interne, comme l'agriculture urbaine et le métabolisme urbain, un secteur qui fait de la *réversion,* ici le compostage urbain et un secteur de reproduction externe d'un *fond* de travail (cf. chapitre II).

Nous nous sommes également intéressés à l'application de la théorie du système de la valeur déjà évoquée au chapitre 5 pour capturer les liens entre les caractéristiques structurales des processus économiques et écologiques et leurs trajectoires de croissance durable. Ceci révèle, l'importance des caractéristiques thermodynamiques et économiques d'un système dans la détermination de la croissance durable de chaque ressource.

Le modèle utilisé dans cette modélisation est construit par l'auteur en se basant sur le prototype d' O'Connor (1993), récemment appliqué en Bretagne par Douguet *et al.* (2000). Sur la base de ce prototype, nous relions le processus de production et consommation physique, comprenant les transformations des différents intrants ou ressources matérielles et énergétiques, avec les échanges ou transferts entre les processus. Ce modèle est ensuite adapté dans une structure détaillée de 6 processus et de 6 ressources. Enfin deux variations de la situation initiale seront étudiées.

13.1 La structure d'un modèle de production jointe

Nous nous inspirerons et suivrons la démarche établie par O'Connor en 1993 pour explorer les systèmes de la valeur. Ce cadre considère un ensemble de processus et des transferts de production physique interdépendants au niveau physique et comme système de la valeur.

13.1.1. Définition physique du système et de la théorie de la valeur

Comme nous l'avons déjà abordé dans les chapitres précédents, une représentation abstraite des relations entre les biens à l'intérieur d'un système de la valeur a été proposée par Sraffa. Cette représentation ne cherche pas à représenter directement les cycles biophysiques. Mais ce système peut être l'expression des relations fondamentalement *asymétriques* qui existent entre la biosphère et l'économie (Kleinod, 2017).

Le système proposé devrait avoir deux fonctions ; d'une part suivre un impératif de croissance économique et d'autre part, recycler ou valoriser les déchets. Ceci nous amène, à définir le niveau d'activité (y) de chaque processus du système, en utilisant le vecteur ligne des quantités q(T) qui représente les quantités disponibles (A) au début de chaque période (T) dans le système de production qui a été définie par la relation q (T)=y(T)A. Les processus génèrent du déchet qui devra disparaitre en (T) ou qui sera réutilise en (T+1). On peut considérer brièvement les hypothèses qui sous-entendent la notion de *don gratuit (free gift)* et *de rejet gratuit*, comme le travail ou le déchet qui sont entretenus ou éliminés en dehors du système sans aucun coût monétaire ou valeur comptable explicite dans le système

de valeur. Ces notions de don gratuit et de rejet gratuit peuvent être rejetées en posant la relation : $y(T)B=q(T+1)=Y(T+1)A$. La question que l'on peut se poser à ce stade est de savoir si l'économie peut atteindre un état stationnaire, dans lequel les ressources naturelles ne seraient pas détruites par l'économie. Cet état stationnaire a été déjà décrit dans le chapitre VIII : il serait caractérisé par un taux de croissance g égal à 0. Ce taux de croissance physique peut être représenté dans la relation: $y(T)B=(1+g)y(T)A$, $y(T)$ étant un vecteur propre (λ) de gauche ou vecteur d'activité de AB^{-1}, comme on peut le voir sur la relation suivant :

$$y(T)AB^{-1} = \frac{1}{1+g}y(T) \quad \text{, où} \quad \frac{1}{1+g} = \lambda \tag{13.1.1}$$

Un système stationnaire peut toujours être mis à jour en développant des processus qui opèrent une réversion en suivant la 1ère règle de la thermodynamique et l'absence de biens gratuits et de rejets gratuits. Cependant, cela ne signifie pas que les systèmes seront durables s'ils fonctionnent avec des processus qui présentent un vecteur d'activité négatif.

Nous pouvons maintenant nous demander quel type de théorie de la valeur est implicitement sous-jacent aux relations entre l'économie et l'environnement. Ce système de valeur permettra d'observer le rapport d'échange, ou prix relatifs qu'on peut observer dans le système capitaliste, où la quantité du capital fiduciaire qui n'est pas payée en salaires, est distribuée sous la forme de profits (Passinetti, 1985). On peut énoncer ensuite comme point de départ les hypothèses de l'unicité du taux de profit entre processus et de l'unicité du prix pour toutes les unités d'une même ressource. Le système de prix est modélisé avec un vecteur en colonne p(T) pour les prix et en posant le taux de profit π ainsi : $Bp(T)=(1+\pi)Ap(T)$, On suppose que les matrices A et B sont des matrices carrées et non singulières, $p(T)$ étant un vecteur propre (λ) ou de prix de $B^{-1}A$, comme on peut le voir sur la relation suivante :

$$B^{-1}Ap = \frac{1}{1+\pi}p \quad \text{, où} \quad \frac{1}{1+\pi} = \lambda \tag{13.1.2}$$

On observera que la relation entre le prix et π est très complexe. Afin de pouvoir étudier les propriétés, il conviendra d'utiliser la convention prochaine qui consistera à exprimer un système de la valeur décomposable et qui sera présentée dans la section 13.2.1.

13.2 Caractérisation d'une économie urbaine : l'exemple de l'incinération et du compostage du déchet

Tout au long de cette section nous utiliserons un ensemble de processus impliquant ressources matérielles et énergétiques comme suit :

- Ménages : Le processus domestique décrit la régénération d'un fond du capital humain qu'utilise le service travail, des aliments et du capital urbain afin de reproduire le capital humain
- Production d'énergie : Le processus industriel décrit l'utilisation de matière primaire, l'énergie primaire et du service travail afin de produire de l'énergie raffinée
- Agriculture : Le processus rural décrit l'utilisation de matière primaire, de l'énergie primaire (soleil) et du service travail afin de produire des aliments

- Métabolisme urbain : Le processus décrit l'utilisation de l'énergie raffinée, des aliments et du capital urbain afin de produire du capital urbain et du déchet
- Agriculture urbaine : Le processus urbain décrit l'utilisation de matière primaire, de l'énergie, du service travail et du compost afin de produire des aliments et du capital urbain
- Compostage : Le processus décrit l'utilisation du service travail et du déchet pour produire du compost et du capital urbain
- Incinération : Le processus décrit l'utilisation de service travail, de l'énergie raffinée, du capital urbain et du déchet, de manière à brûler le déchet urbain afin de générer de l'énergie raffinée et des polluants.
- Mise en décharge : Le processus décrit l'utilisation du service travail, du capital urbain et des déchets afin de déposer et stocker les déchets ultimes
- Service de reproduction de la force de travail : Le processus décrit un service de reproduction d'un *fond* de force de travail. Le processus est externe au système économique.
- Manutention des infraestructures physiques : Le processus décrit la manutention d'un *fond* du capital physique (machines et usine).

Ensuite pour étudier séparément certaines variations de cette structure, nous emploierons des formes simplifiées concernant les intrants et les sorties en fonction de chaque variation à étudier. Cette liste de processus s'appuie sur une structure matricielle décomposable (annexe XIII.A).

Nous pouvons annoncer des conventions pratiques vont qui sous-tendre l'analyse de la section 13.2 comme suit :

- Le système de la valeur de la section 13.2 a été présenté en seulement 6 processus ou branches de l'économie, qui permettent d'illustrer dans leurs grandes lignes, les caractéristiques principales du système de la valeur.
- Nous pouvons remarquer que s'il s'agit de construire un tableau dans le cas d'une économie urbaine, on se retrouvera confronté aux problèmes d'ajustement du modèle théorique à la realité avec des données empiriques (cf. sections 7.5 et 7.6), comme pour le cas de la mise en décharge, de l'incinération et du compostage urbain de la section 13.2. Dans ce contexte où nous avons procédé à un travail de collecte de données très dispersées, nous avons parfois agrégé des processus productifs, en les représentant par une seule ligne, et dans la colonne correspondante tout le processus de compostage (qui en filigrane inclut le processus de tri à la source) est par exemple agrégé. Les différents degrés d'agrégation que adoptera la matrice permettront de montrer en détail les relations de valeur entre les processus et les ressources.
- Nous pouvons constater qu'un système économique réel ne se trouve presque jamais à l'État stationnaire (cf. section 12.1). On pourrait se demander quel type de technique est implicitement sous-jacent à cet état non stationnaire ou d'amélioration technologique continue ? On peut adopter par convention la référence à l'année calendaire comme unité de temps avec un seul type de technique pour tous les processus (cf. sections 5.3 et 5.5).

13.2.1. Il était une fois un type d'économie : un modèle de mis en décharge du déchet

Nous sommes dans le contexte parisien avant 1970 où il existait un problème de mise en décharge important qu'il était nécessaire de questionner. On pourrait se demander quel type de théorie de la valeur est implicitement sous-jacent à cet état de fait. On peut annoncer brièvement l'hypothèse suivante : les sous-produits économiques *gênants* peuvent être ignorés et expédiés vers la biosphère sans aucune conséquence pour l'économie, comme l'indique le premier cas de la typologie proposée par Jason Moore (2015) et qui a été déjà étudié au chapitre VI de la thèse. L'autre solution consiste à contrôler et utiliser les déchets comme un intrant (*input*) en tant que matière première, mais avec l'éventuel rejet d'un déchet ultime comme l'indique les deuxième et troisième cas de la typologie développée par Jason Moore (2015).

Cette partie propose une analyse du système de la valeur et de la disponibilité des ressources dans une situation initiale qui considère un processus de mise en décharge comme méthode pour se débarrasser du déchet. En outre, nous pouvons faire l'hypothèse que dans les années 60 tous les déchets étaient mis en décharge.

Cette structure utilise comme intrants un déchet, un service de travail et un capital économique. Ensuite la mise en décharge produit un coût de décharge qui peut être très élevé. Un système décomposable sera présent ci-dessous, d'autres variables sont bien sûr possibles, mais ces propositions seront suffisantes au début pour nos besoins.

Système de valeur 13.2.1

	Input				**Output**			
	service travail	*capital*[133]	*déchet*	*déchet ultime*				*déchet ultime*
Ménages	a_{11}	0	0	0	b_{11}	0	0	0
Processus écon A	a_{21}	a_{22}	0	0	0	b_{22}	b_{23}	0
Processus écon B	a_{31}	a_{32}	0	0	0	b_{32}	b_{33}	0
Mise en décharge	a_{41}	a_{42}	a_{43}	0	0	0	0	b_{44}

Ce schéma intègre les trois formes de processus décrits dans notre classement du chapitre VIII. C'est-à-dire un processus externe, deux processus économiques et un processus de traitement ou de décharge du déchet.

[133] Une remarque : si les deux processus économiques (A et B) produisent le même bien (ici du capital), il peut y avoir une rente différentielle entre ces 2 processus, vu que l'un peut être plus profitable que l'autre (inputs moins couteux, donc production plus rentable).

1. La ligne supérieure permet à la ressource travail d'être reproduite comme un *fond* avec un taux de reproduction $g_1 = (b_{11}-a_{11})/a_{11}$. J'ai décidé de définir le travail comme un service du travail qui peut être utilisé par l'économie. Il sera renouvelle via uniquement un *fond* de travail qui se renouvelle sans input économique – on peut songer à des travailleurs qui en dehors de leurs travail cultivent leurs moyens de subsistance.

   Les schémas théoriques développés dans les chapitres précédents renvoyaient à la question de la force de travail, i.e. lequel a été considéré comme une donnée exogène et encore comme constante dans le temps. Dans la réalité cependant, la force de travail s'inscrit dans un service, ce qui donnée à les propriétaires du service (ménages) un profit. Cet arbitrage entre le taux de profit, le retour sur le service fourni par la terre et le retour sur le service fourni pour la force de travail est reconnu par Marx dans la théorie du travail (cf. section 5.1.1), par Moore dans la notion de *4cheaps* (cf. section 6.3.2) et par les Sraffiens à travers la représentation implicite des ménages qui est au dehors de l'économie, parce que les ménages ne présentent pas une transaction monétaire dans le secteur de subsistance (première file de la dernière figure). Cependant, les ménages représentent un retourn en termes de salaire sur la quantité de service travail rendu qui est représentée par le vecteur des inputs de service travail.

   Plus précisément, nous pouvons présenter le retourn sur le service force de travail comme un retourn donné au ménage ou un profit payé à la force de travail industrielle, cet arbitrage ne donne pas le même résultat au niveau de structure de processus, de distribution de revenu et de gouvernance dans la société.

   Nous voulons utiliser une simplification[134] afin de définir le service. Elle ne fait pas de distinction entre un stock de force de travail et un fond de travail domestique. Ce service présente le ménages (entretien du capital humain-domestique) comme un processus recevant un revenu du service fourni par la force de travail.

   Nous pouvons utiliser aussi la définition proposée par Erreygers (1990) de la quantité de travail v (cf. section 5.1.1). Cette définition d'origine marxienne explore une quantité de travail mort et une quantité de travail vivant. Pour formaliser cette définition nous pouvons écrire v_j qui correspond au vecteur des valeurs-travail du j-ième équation du système.

[134] Nous avons appliqué à notre dernière matrice des dimensions 4x4 une modification pour présenter un *service travail*. Également, nous pouvons utiliser une structure allongée (matrice asymétrique) avec une colonne pour définir le *capital domestique* qui est entretenu comme un *fond* et autre de service fourni par les ménages (*service travail*).

	Input					**Output**				
	service travail	capital domest	capital urbain	déchet	déchet ultime	service travail	capital domest	capital urbain	déchet	déchet ultime
Ménages	a_{11}	a_{12}	0	0	0	0	b_{12}	0	0	0
Processus écon A	a_{21}	0	a_{23}	0	0	0	0	b_{23}	b_{24}	0
Processus écon B	a_{31}	0	a_{33}	0	0	0	0	b_{33}	b_{34}	0
Mise en décharge	a_{41}	0	a_{43}	a_{44}	0	0	0	0	0	b_{45}

$$v_j = a_{j1}v_1 + a_{j2}v_2 + \ldots + a_{jk}v_k + l_j \qquad (13.2.1.1)$$

La quantité de travail $[a_{j1}v_1 + a_{j2}v_2]$ constitue le *travail mort* et l_j correspond le *travail vivant* incorporé dans la valeur de la marchandise j.

Marx désigne le travail mort le plus souvent sous le terme de capital constant. Le *travail vivant*, en revanche, est composé de deux éléments. D'une part, il y a le *travail* rémunéré, qui est égal à la valeur de la force de travail, c'est-à-dire : égal à l_j fois la valeur du panier salarial. D'autre part, il y a le travail non rémunéré (ou *surtravail*), qui est approprié par les capitalistes sans contrepartie (Erreygers, 1990). Nous pouvons mentionner que le ménage utilise un capital domestique ou *surtravail* pour produire un *fond* de travail. Nous pouvons donc diviser la journée en deux parties, le *travail* et le *surtravail* nécessaire à l'entretien du producteur et de sa famille (Marx, 1865).

2. Le deuxième processus du système de valeur 13.2.1 représente un processus économique comme l'agriculture qui permet d'augmenter un capital économique (ressource 2) avec un taux de croissance $g_2 = (b_{22}-a_{22})/a_{22}$.

3. Le troisième processus du système de valeur 13.2.1 explore un processus économique comme le métabolisme urbain qui permet d'augmenter un capital économique (ressource 2) avec un taux de croissance $g_3 = (b_{32}-a_{32})/a_{32}$.

4. La ligne inférieure du système de valeur 13.2.1 représente l'élimination d'un déchet par la décharge, et le stockage d'un déchet ultime. Les signes et les valeurs des prix qui accompagneront les coefficients donneront diverses significations. Par exemple si le signe d'un intrant est négatif nous autorisons à ce qu'il représente le coût de mise en décharge. En revanche, nous établions que le prix des déchets ultimes dans les outputs est zéro, donc la valeur de p_4b_{44} est égal à zéro.

Les types du solutions pour les vecteurs d'activité et pour les vecteurs de prix dépendent fortement des hypothèses sur les éléments non nuls de la quatrième ligne du système 13.2.1.

Prenons tout d'abord, l'analyse des variations des solutions pour la quatrième ligne qui représente la mise en décharge. Par commodité, nous définirons que dans l'opération de mise en décharge, p_1a_{41} représente le salaire de travail p_1 pour la quantité de travail utilisé a_{41}, p_2a_{42} représenté le prix du capital urbain utilisé p_2 multiplié par la quantité du capital utilisé a_{42} dans le métabolisme urbain. p_3a_{43} représente le coût monétaire de décharge, c'est-à-dire la subvention p_3 multipliée par la quantité du déchets mis en décharge a_{43}, p_4b_{44} représente le prix du déchet ultime p_4 multiplié par la quantité du déchet ultime présents dans la décharge b_{44}.

$$[p_1a_{41} + p_2a_{42} - p_3a_{43} + 0](1+r) = [0+0+0+p_4b_{44}] \qquad (13.2.1.2)$$

Nous pouvons faire l'hypothèse que le prix pour les déchets ultimes dans les outputs est zéro, donc p_4b_{44t} est égal à zéro. Pour résoudre l'égalité nous pouvons, d'un côté utiliser la valeur négative de p_3a_{43} pour neutraliser la valeur nette des inputs égaux à zéro. Ensuite nous cherchons le prix p_3 qui va permettre d'avoir un équilibre comptable, donc une valeur nette égale à zéro. Cette valeur p_3a_{43} permet de payer le coût de service de mise en décharge. Nous pouvons supposer que le service de décharge opère avec une

perte financière. Donc, le propriétaire du service de décharge, après avoir payé tous les coûts, ne gagnera pas du capital financier, à moins qu'il n'existe une subvention comme le représente p_3a_{43}. Cette situation peut être représentée en matière comptable comme une disparition de la valeur ou comme un problème de retour sur les *inputs*. En revanche, aucun capitaliste voudrait faire tourner ce processus de disparition de la valeur. Enfin, nous pouvons avoir la valeur des inputs égale à zéro si l'on pose $1+r=0$ avec r=-1. Cependant, un taux de retour de r=-1 n'a pas de sens dans un processus qui a été caractérisé, en matière comptable et dans la réalité physique, pour une valeur positive, et de plus cela oblige les outputs à prendre une valeur nulle.

Considérons, à partir du cas de la mise en décharge, un exemple numérique. Considérons le schéma (4x4) ci-dessous ; A et B sont :

$$\begin{matrix}[\,6 & 0 & 0 & 0\,]\,[\,6 & 0 & 0 & 0\,]\\ [\,2 & 5 & 0 & 0\,]\,[\,0 & 7.5 & 5 & 0\,]\\ [\,2 & 5 & 0 & 0\,]\,[\,0 & 7.5 & 10 & 0\,]\\ [\,2 & 5 & 10 & 0\,]\,[\,0 & 0 & 0 & 10\,]\end{matrix} \qquad (13.2.1.3)$$

Le premier processus indique le renouvellement d'un *fond* de travail (service du travail). Les deuxième et troisième lignes représentent la capacité d'augmenter le capital économique (ressource 2) avec un taux de croissance g maximum de 50% par période. La ligne quatre indique le passage du déchet (ressource 3) à déchet ultime (ressource 4).

Pour $\pi_3 = g_3 = (b_{32}\text{-}a_{32})/a_{32} = 50\%$, on obtient les prix en transposé, p = [0, 0.89, 0, 0.45]. Les vecteurs et valeurs propres sont précisés en annexe XIII.C.

Le vecteur propre $\boldsymbol{y}$ associé à g_2=50% n'est pas négatif. Cela signifie qu'en partant d'un vecteur d'activité initial y_0 = [1, 0, 0, 0], le vecteur d'activité suppose la croissance équilibré seule du premier processus dans un parcours dynamique. Cela signifie qu'aucune évolution soutenable du système vers un stade d'équilibre ne sera possible (cf. section 12.1).

Prenons maintenant l'analyse des variations des solutions de la quatrième ligne qui représente la mise en décharge. Nous pouvons faire l'hypothèse que le prix pour les déchets ultimes dans les *outputs* est égal à 0.45, donc p_4a_{44} est différent à zéro. Ensuite nous voulons analyser les intrants et les sorties du point de vue comptable comme suit :

$$[0*2+0.89*5-0*10+0.45*0](1+r)= [0+0+0+0.45*10] \qquad (13.2.1.4)$$

Étant donné cette structure, du point de vue comptable, on trouve $[4.45](1+r)=[4.5]$. Donc r devra être égal à 11% pour permettre cette égalité. Cette valeur permet de payer le coût du service de décharge, alors la valeur de r représente ce qui est nécessaire à l'égalisation entre les inputs et les outputs dans le processus de mise en décharge.

Maintenant, nous nous proposons d'introduire une variation dans notre deuxième et troisième processus comme suit :

$$\begin{matrix}[\,2 & 5 & 0 & 0\,]\,[\,0 & 6 & 5 & 0\,]\\ [\,2 & 5 & 0 & 0\,]\,[\,0 & 6 & 10 & 0\,]\end{matrix} \qquad (13.2.1.5)$$

Où $g_3 = (b_{32}\text{-}a_{32})/a_{32} = 20\%$, avec les prix en transposé, p = [0.42, 0.84, 0, 0.34]. Les vecteurs et valeurs propres sont précisés dans l'annexe XIII.C.

Le vecteur propre **y** associé à g_3=20% n'est pas négatif. Cela signifie qu'en partant d'un vecteur d'activité initial y_0 = [1, 0, 0, 0], le parcours dynamique permettra une accumulation seule du travail (ressource 1) à 20% par période. Cela signifie qu'aucun sentier soutenable du système ne sera possible vers un stade d'équilibre. Dans cette variation le travail devient non gratuit avec un coût de 0.42. Ensuite nous voulons analyser les intrants et les sorties d'un point de vue comptable comme suit :

[0.42*2+0.84*5-0*10+0.34*0](1+r)= [0+0+0+0.34*10] (12.2.1.6)

Dans cette structure, d'un point de vue comptable le système peut être représenté ainsi [5.04] (1+r) = [3.4]. Donc r devra être égal à -33% pour permettre cette égalité. Cette valeur ne permet pas de payer le coût pour le service de mise en décharge. Cette situation présente d'une manière comptable une disparition de la valeur à travers d'un manque des retours sur les inputs. En revanche, difficilement un capitaliste voudrait faire tourner ce processus avec r = -33%.

Étant donné que la mise en décharge est non-soutenable au niveau économique, on peut envisager le fait d'accepter une compensation (p_3) pour chaque tonne du déchet mise en décharge (a_{43}).

13.2.2. Un modèle d'incinération du déchet

Comme nous avons déjà mentionné il existe un problème de mise en décharge important que nous devons questionner. Pour faire évoluer la situation initiale de mise en décharge des déchets, nous nous proposons maintenant d'étudier un problème particulier et nous l'aborderons pour l'instant via un processus d'incinération. Nous pouvons donc faire l'hypothèse qu'à partir des années 70 tous les déchets sont mis en incinération. A ce propos, l'usine d'ordures ménagères d'Ivry-Paris XIII a été construite en 1969, et régulièrement modernisée depuis, ce centre dispose à présent d'une capacité de traitement de 730.000 tonnes d'ordures ménagères par an (Ivry94, 2016).

Nous commencerons par l'examen du système de la valeur. C'est en ce sens là que la question se pose en matière comptable, en effet, à savoir: est-ce que cela coute plus cher d'opérer une incinération ou une mise en décharge ? Pour répondre à cette question, on propose une analyse du système de la valeur et de la disponibilité des ressources à partir d'une variation de notre situation initiale. Cette variation considère l'incinération des déchets avec génération d'énergie comme une solution pour se débarrasser du déchet. Cette solution utilise comme intrants un déchet, un service de travail et un capital économique.

Posons que la société est contrainte d'utiliser les déchets comme intrant pour un incinérateur. Elle se voit dans l'obligation de trouver une autre solution pour faire disparaître les déchets, en dehors de la simple logique de mise en décharge. Cet enjeu se traduit dans un premier temps par l'intégration d'un processus et dans un sens inter-temporel par l'obligation d'avoir des sorties ou des outputs qui se présentent sur la forme d'un déchet à la fin de la période, avant d'être mobilisés pour la prochaine période.

Cette phrase est à l'origine de l'équation dynamique d'activité :

$$
\begin{array}{lll}
y\,(t)A \rightarrow & y\,(t)B = & y\,(t{+}1)A \\
\uparrow & & \uparrow \\
q\,(t) & \rightarrow \quad q\,(t{+}1) &
\end{array}
$$

L'activité d'intrant ou d'*input A* dans la période t génère une sortie ou un *output B* présent à la fin de la période *t*. J'impose qu'il doit être un input en *t+1*, quelque soit la quantité q en (t) ou le vecteur des ressources qui sont mobilisées en $q\ (t{+}1)$. Dans cette équation il n'existe pas une relation de croissance équilibrée. Donc, les équations itératives peuvent être imposeés comme une alternative pour montrer qu'à partir d'un vecteur d'activité initial y en (t) si le système génère des ressources, il devra avoir la capacité de les accepter.

Le système proposé devrait avoir deux fonctions, d'une partie un impératif de croissance économique et d'autre part recycler ou valoriser les déchets. Si le système est dans l'obligation d'engager un capital économique dans chaque période, il se donne l'obligation de mobiliser des ressources naturelles, de créer de cette pollution et de se débarrasser de cette pollution. Ensuite nous devons explorer deux facettes du système. D'une partie la faisabilité et d'autre les relations de valeur qui peut y être associées.

Le système va montrer un processus de métabolisme urbain qui produit des déchets. Nous devons trouver les secteurs de l'économie qui utilisent les déchets comme source de réversion (cf. chapitre VIII). Ainsi, nous pouvons caractériser les intrants en A avec des coefficients permettant d'exemplifier cette démarche. Ensuite, le système propose des solutions à travers de processus d'incinération et leurs variations avec un coût.

L'incinération est un processus qui utilise du travail, de l'énergie, du capital et des déchets afin de produire de l'énergie. Le raisonnement est le suivant : qu'est-ce qu'il faut mettre comme propriété du modèle pour exprimer un sujet qui devrait une préoccupation pour la société ? Cette préoccupation devrait avoir des conséquences économiques en termes d'appropriation de la valeur sur notre système.

Un système décomposable sera présent, d'autres variables sont possibles, mais ces propositions seront suffisantes au début pour nos besoins.

Système de valeur 13.2.2

	Input				**Output**			
	Service travail	*cap*	*énergie*	*déchet*				
Ménages	a_{11}	0	0	0	b_{11}	0	0	0
Processus écon A	a_{21}	a_{22}	a_{23}	0	0	b_{22}	0	b_{24}
Processus écon B	a_{31}	a_{32}	a_{33}	0	0	b_{32}	0	b_{34}
Incinération	a_{41}	a_{42}	0	a_{44}	0	0	b_{43}	b_{44}

Ce schéma intègre les trois formes de processus décrites dans notre classement du chapitre VIII. C'est-à-dire un processus externe, un processus économique et un processus d'incinération du déchet.

1. La ligne supérieure du système de valeur 13.2.2 permet au service du travail d'être reproduite comme un *fond* avec un taux de reproduction $g_1 = (b_{11}-a_{11})/a_{11}$.

2. Le deuxième processus du système de valeur 13.2.2 représente un processus économique comme l'agriculture qui permet d'augmenter un capital économique variable (ressource 3) avec un taux de croissance $g_2 = (b_{23}-a_{23})/a_{23}$.

3. Le troisième processus du système de valeur 13.2.2 explore un processus économique comme le métabolisme urbain que permet d'augmenter un capital économique (ressource 3) avec un taux de croissance $g_3 = (b_{33}-a_{33})/a_{33}$.

4. La ligne inferieure du système de valeur 13.2.2 représente une variation de notre situation initiale de mise en décharges et stockage d'un déchet ultime, cette variation considère l'incinération des déchets avec la génération d'énergie. Les signes et les valeurs des prix qui ccompagnent les coefficients donneront diverses significations.

Le métabolisme urbain ou troisième processus produit un polluant nuisible pour la santé humaine avec une obligation de paiement pour se débarrasser. Ainsi, le secteur qui produit le polluant devra payer pour se débarrasser de ce polluant. Après, nous devons nous poser la question de comme représenter ce paiement. Une réponse est de donner un prix négatif au déchet à travers une transaction qui va à utiliser le service du travail et du capital.

Par commodité, nous définirons que dans l'opération d'incinération (figure 13.2.2), p_1a_{41} représente le salaire de travail p_1 pour la quantité de travail utilisé a_{41}, p_2a_{42} représente le capital utilisé au prix p_2 pour la quantité du capital utilisé a_{42} dans le métabolisme urbain, p_4a_{44} représente le coût monétaire de l'incinération, c'est-à-dire la subvention p_4 multipliée par la quantité incinérée a_{44}, p_3b_{43} représente le prix de l'énergie ultime p_3 multiplié par la quantité d'énergie produit b_{43}.

$$[p_1a_{41}+p_2a_{42}+0-p_4a_{44}](1+r)= [0+0+p_3b_{43}+p_4b_{44}] \qquad (13.2.2.1)$$

L'énergie en tant que forme d'énergie raffinée est présentée comme un *input* égal à zéro dans le processus de l'incinération. Dans la réalité il y a un *input* d'énergie mais comme du point de vue comptable l'*output* est plus important que l'*input*, nous pouvons dire que le secteur d'incinération est en train de produire de l'énergie. Ainsi nous pouvons raisonner par convention, en termes de l'énergie nette. Donc si nous produisons 4 Gjoules et nous utilisons 2 Gjoules, la valeur nette sera de 2 Gjoules pour b_{43}. De la même manière, les déchets ultimes ne sont pas présentés explicitement dans notre exemple, mais ils ont été envoyés dehors du système avec un prix p_4 égal à zéro. Donc, nous pouvons considérer que p_4b_{44} est égal à zéro.

Pour maximiser la lisibilité, nous prenons quelques exemples numériques. Considérons le schéma (4x4) ci-dessous ; A et B sont :

$$\begin{bmatrix} 6 & 0 & 0 & 0 \\ 2 & 5 & 1 & 0 \\ 2 & 5 & 2 & 0 \\ 2 & 5 & 0 & 15 \end{bmatrix} \quad \begin{bmatrix} 6 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 7.5 & 0 & 5 \\ 0 & 7.5 & 0 & 10 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

Le premier processus indique le renouvellement d'un *fond* de travail comme une service. Les deuxième et troisième lignes représentent la capacité d'augmenter le capital économique (ressource 2) avec un taux de croissance g maximum de 50% par période. La dernière ligne indique l'incinération du déchet (ressource 4), avec l'utilisation d'un capital (ressource 2) afin de générer de l'énergie (ressource 3).

Pour $g_3 = (b_{33}\text{-}a_{33})/a_{33} = 50\%$, on obtient les prix en transposé, p = [0.30, 0.24, -0.9, -0.18]
Dans cette variation le service travail devient non gratuit avec une valeur de 0.30. Ensuite le vecteur propre **y** associé à g_2=50% n'est pas négatif. Cela signifie qu'en partant d'un vecteur d'activité initial y_0 = [1, 0, 0, 0], le parcours dynamique de processus permet une reproduction de d'un service travail (ressource 1) à 50% par période. Cela signifie qu'aucune évolution soutenable du système vers un stade d'équilibre ne sera envisageable.

Prenons, l'analyse des solutions de la quatrième ligne qui représente l'incinération, Nous pouvons faire l'hypothèse que le prix pour les déchets ultimes dans les *outputs* est égal à 0. Ensuite nous voulons analyser les intrants et les sorties de manière comptable comme suit :

$$[0.3*2+0.24*5-0.9*0-0.18*15](1+r)= [0+0-0.9*1+0] \qquad (12.2.2.2)$$

Étant donné cette structure en matière comptable, on peut la représenter comme suit [-0.9](1+r)=[-0.9]. Donc r devra être égal à 0 pour permet cette égalité. Du point de vue comptable, nous pouvons dire que le processus d'incinération va générer une perte du capital économique. Cette perte pourrait être représentée de deux façons differentes.

Premièrement, nous pouvons considérer qu'il y a eu un paiement unitaire direct pour le service de valorisation du déchet comme l'exprime $p_4 a_{44}$. En input, le prix p_4 représente le paiement par tonne du déchet incinéré avec un taux de retour égal à 1+r. Cette perte permettra d'explorer une situation politique où les prix sont administrés. Cette administration fixera la perte en matière comptable pour les proprietaires des processus. Cependant, cette perte ne permettra pas de financer le fonctionnement du processus. En conséquence, l'État devra donner une subvention pour faire fonctionner le processus.

Deuxièmement, nous pouvons poser que le prix de l'énergie est négatif. Donc, nous ne pouvons pas représenter le processus comme rentable de point de vue de l'énergie. De plus, nous pouvons décrire un prix négatif p_4 = -0.18 pour la subvention qui fait partie des inputs. L'incinérateur produit de l'énergie, et génère une perte chaque année à la fin de la période. Même si le but est de se débarrasser du déchet, générer de l'énergie peut-être un complément de revenu. Mais malheureusement, dans ce scénario, le prix de l'énergie est négatif.

Maintenant, nous voulons introduire une variation dans notre deuxième et troisième processus de la figure 13.2.2 comme suit :

$$\begin{bmatrix} 2 & 5 & 1 & 0 \\ 2 & 5 & 2 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 & 6 & 0 & 5 \\ 0 & 6 & 0 & 10 \end{bmatrix}$$

Où $g_3 = (b_{32}\text{-}a_{32})/a_{32} = 20\%$, avec les prix en transposé, p = [0.15, 0.31, -0.92, -0.18]. Les vecteurs et valeurs propres sont précisés en annexe XIII.C.

Le vecteur propre y associé à g_3=20% n'est pas négatif. Cela signifie qu'en partant d'un vecteur d'activité initial y_0 = [1, 0, 0, 0], le parcours dynamique de processus permettra une accumulation du capital économique (ressource 2) de 20% par période. Cela signifie qu'aucun évolution soutenable de processus vers un stade d'équilibre ne sera posible. Ensuite nous voulons analyser les intrants et les sorties du point de vue comptable comme suit :

$$[0.15*2+0.31*5 -0.92*10-0.18*0](1+r)= [0+0-0.92*1+0] \quad (13.2.2.3)$$

Dans cette structure, au niveau comptable, le système peut être présenté ainsi : [-0.85] (1+r) = [-0.92]. Donc r devra être égal à 8% pour permettre cette égalité. Cette valeur va permettre de payer le coût du service d'incinération. Cette situation représente du point de vue comptable une création de la valeur à travers des retours sur les inputs.

13.2.3. Système de la valeur avec coût d'entretien de l'incinérateur

Maintenant, nous voulons introduire dans les variations, deux processus: la production d'énergie et l'entretien (maintenance) d'un capital fixe. Ainsi, le système décomposable sera présent comme suit :

Système de valeur 13.2.3

	Input						**Output**					
	service travail	*énergie*	*alim*	*cap var*	*cap fix*	*déchet*						
Ménages	a_{11}	a_{12}	0	0	0	0	b_{11}	0	0	0	0	0
Production d'énergie	a_{21}	0	0	a_{24}	0	0	0	b_{22}	0	0	0	0
Agriculture	a_{31}	0	0	0	0	0	0	0	b_{33}	0	0	0
Métabolisme urbain	a_{41}	a_{42}	a_{43}	a_{44}	0	0	0	0	0	b_{44}	0	b_{46}
Entretien capital fixe	a_{51}	0	0	0	a_{55}	0	0	0	0	0	b_{55}	0
Incinération	a_{61}	0	0	0	a_{65}	a_{66}	0	b_{62}	0	b_{64}	0	0

Par commodité, nous définirons que dans l'opération d'incinération p_5a_{65} , représente le fait que le capital fixe devra être entretenu avant et après l'opération d'incinération avec un coût p_5. Ensuite p_4a_{64} représente le capital variable au prix p_4 multiplié par la quantité du capital produit b_{64} dans le métabolisme urbain.

$$[p_1a_{61}+0+0+p_4a_{64}+p_5a_{65} -p_6a_{66}](1+r)= [0+p_2b_{62}+0+p_4b_{64}+0+0] \quad (12.2.3.1)$$

Est-ce qu'il existe un lien entre les coefficients qui représentent le processus d'entretien de l'incinérateur et les coefficients qui représentent le processus d'incinération ? Il existe deux possibles réponses possibles à cette question :

Dans la première, le coefficient d'entretien de l'incinérateur est représenté par un coût fixe. Il est indépendant du volume de production dans le processus d'incinération. Il s'agit du coût supporté par le propriétaire de l'incinération en tout état de cause, quel que soit le niveau de son activité : l'entretien courant de matériel et une partie des frais sont des dépenses qui doivent être supportées indépendamment du volume de production (Abraham-Frois, 1992).

La seconde porte sur le critère de Sraffa (1960). Selon lui les machines, les installations et les bâtiments sont achetés ou installés à un certain moment, mais la durée peut être supérieure à une année, contrairement à d'autres moyens de production qui sont achetés et utilisés entièrement dans la même période. Il existe donc deux types de moyens de production dépendant du cycle de vie du bien. Ce point de vue implique que la même machine, à des âges différents, doit être traitée comme autant de produits différents, chacun avec son prix.

Notre cas d'incinération des déchets porte sur une simplification[135] pour présenter un capital fixe. En suivant Sraffa, nous pouvons utiliser une structure allongée d'une colonne pour définir le capital fixe nouveau (usine neuve au début de la période) et un autre capital fixe non neuf (usine déjà utilisée et dépréciée à la fin de la période).

[135] Nous avons utilisé une variation du système de valeur 13.2.3 pour présenter un capital fixe. Également, nous pouvons utiliser une structure allongée avec une colonne pour définir le capital fixe nouveau (usine neuf au début de la période) et un autre capital fixe non neuf (usine déjà utilise et déprécie à la fin de la période).

Input

	Service travail	*énergie*	*cap var*	*cap fixe neuf*	*cap fixe no-neuf*	*déchet*
Ménages	*3.7*	*1.2*	*0*	*0*	*0*	*0*
Processus écon A	*0.1*	*0*	*0*	*0*	*0*	*0*
Processus écon B	*2.9*	*1.3*	*0.9*	*0*	*0*	*0*
Service entretien capital fixe	*0.1*	*0*	*0*	*0.8*	*0*	*0*
Incinération	*0.1*	*0*	*0*	*0.8*	*0*	*1.1*

Output

	Service travail	*énergie*	*cap var*	*cap fixe neuf*	*cap fixe no-neuf*	*déchet*
Ménages	*3.7*	*0*	*0*	*0*	*0*	*0*
Processus écon A	*0*	*0*	*0*	*0*	*0*	*0*
Processus écon B	*0*	*0*	*1.3*	*0*	*0*	*1.1*
Service entretien capital fixe	*0*	*0*	*0*	*0*	*0.8*	*0*
Incinération	*0*	*1*	*0.5*	*0*	*0*	*0*

Prenons maintenant l'analyse du capital fixe que représentent le bâtiment (usine) neuf et le bâtiment (usine) non neuf (cf. à la fin de la section 8.3). Comment articuler l'existence de l'incinérateur au niveau d'activité du processus d'incinération?

Par commodité, nous définirons que dans l'opération d'incinération (équation 12.2.3.2), P représente le prix du capital fixe M avec une durée supérieure à l'année (n), Y représente le produit final avec une durée inférieure ou égale à l'année (n), w représente le salaire payé par la quantité du travail L. P_m représente le prix du capital fixe M qui représente le bâtiment (usine) avec une durée supérieur à l'année (s), r représente le taux de retour du système. (Kurz *et al.* 2006).

$$\underset{1xn\,nxn}{P}\ \underset{}{Y} = w\ \underset{1xn}{L} + (1+r)\ \underset{1xn\,nxn}{P}\ \underset{}{X} + \frac{r(1+r)^n}{(1+r)^n - 1}\ x\ \underset{1xs}{P_m}\ \underset{sxm}{M} \qquad (12.2.3.2)$$

Cette équation exprime une articulation directe entre le prix du capital fixe P_m avec une durée supérieure à l'année et le prix des autres ressources P avec une durée inférieure ou égale à l'année (n). Donc, nous pouvons constater que les prix des ressources pluriannuels (bâtiment) du processus d'entretien du capital, dépendent des prix des ressources non pluriannuelles comme l'énergie et le capital variable qui sont utilisés dans le processus d'incinération.

Maintenant, nous allons calibrer notre modèle avec des données provenant de la région île-de-France[136]. Considérons le schéma (6x6) ci-dessous; A et B sont respectivement :

$$\begin{bmatrix} 3.7 & 1.2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0.5 & 0 & 0 & 0.5 & 0 & 0 \\ 0.1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 2.9 & 1.3 & 2.2 & 0.9 & 0 & 0 \\ 0.1 & 0 & 0 & 0 & 0.8 & 0 \\ 0.1 & 0 & 0 & 0 & 0.8 & 1.1 \end{bmatrix} \qquad \begin{bmatrix} 3.7 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1.5 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 2.2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1.3 & 0 & 1.1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0.8 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0.5 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

La quatrième ligne permet au capital fixe (les machines pour l'incinération) d'être entretenus comme un *fond* avec un taux de croissance de $g_4 = (b_{44}\text{-}a_{44})/a_{44}$.

Nous obtenons un métabolisme urbain avec un $g_4 = (b_{44}\text{-}a_{44})/a_{44} = 50\%$ et les prix[137] en transposée, p = [-0.44, -0.3, 0.27, -0.62, -0.25, -0.45]

Dans cette variation le service du travail devient non gratuit, avec $p_1 \neq 0$. Ensuite le vecteur propre $\mathbf{y}$ associé à g_2 n'est pas négatif. Cela signifie qu'en partant d'un vecteur d'activité initial y_0 = [-0.08, 0, 0.99, 0.07, 0, 0], le parcours dynamique des processus permettra une accumulation du capital économique (ressource 4) de 50% par période, avec une génération du déchet (ressource 6). Cela signifie qu'aucun évolution soutenable des processus vers un stade d'équilibre ne sera pas possible.

[136] Nous avons évoqué dans la matrice 6x6 des données d'Île-de-France. On peut annoncer brièvement la source des données par type de ressource comme suit:
Travail : Insee (2012), (2017).
Energie : ADEME (2010b).
Aliment : Chambagri (2016) ; DRIAAF (2014) ; CROCIS(2006) ; Agreste (2014)
Capital : IAU., Insee., CCI Paris Ile-de-France. (2016)
Déchet : ADEME (2011), (2014) ; IAU., Insee., CCI Paris Ile-de-France. (2016) ; DRIEA (2012)

[137] Nous avons calculé les prix en annexe XIII.C

Faisons l'analyse des solutions de la sixième ligne qui représente l'incinération. Nous pouvons faire l'hypothèse que le prix pour les déchets ultimes dans les *outputs* est égal à 0. Ensuite nous voulons analyser les intrants et les sorties d'un point de vue comptable comme suit :

$$[-0.44*0.1-0.3*0+0.27*0-0.62*0-0.25*0.8-0.495*1.1](1+r)=[-0.44*0-0.3*1+0.27*0-0.62*0.5-0.25*0-0.45*0] \quad (12.2.3.3)$$

Étant donné cette structure, elle est représentée d'un point de vue comptable par $[-0.751](1+r)=[-0.614]$. Donc r devra être égal à -18% pour permettre cette égalité. Dans le domaine comptable, nous pouvons dire que le processus d'incinération va générer une perte du capital économique. Cette perte pourrait être représentée comme un paiement unitaire direct pour le service de valorisation du déchet $p_6 a_{66}$. En input, le prix p_6 représente un paiement pour le service d'incinération avec un taux de retour égal à $1+r$. Cette perte permettra d'explorer, comme dans le cas précédent, une situation politique où les prix sont administrés. Cette administration donnera une perte en matière comptable pour les propriétaires des processus. Cette perte ne permettra pas de financer le fonctionnement du processus. En conséquence, l'État devra donner une subvention pour faire fonctionner le processus.

On peut décrire brièvement le fonctionnement du système de subvention du déchet en € HT par habitant. Considérons le cas particulier de VALTOM à Clermont-Ferrand.

147 (coût complet) [138] = 5 (vente de matériaux et d'énergie) + 11 (soutien Eco-emballages et Ecofolio) + 2.5 (aides) + 125 (TEOM[4] ou REOM[139]) + 2.6 (redevance spéciale) + 0.9 (facturation des professionnels)

Nous pouvons constater immédiatement que plus de 85% de coût complet est payé par la collectivité (TEOM ou REOM). Ce coût peut être subventionné à hauteur de 25 % donc 31€ HT par habitant[140]. Finalement, la valeur négative de r égal à -18% été en concordance avec la nécessité de maintenir une subvention.

13.2.4. Un modèle de compostage du déchet

Comme nous avons déjà évoqué avec l'usine d'ordures ménagères d'Ivry-Paris XIII, il existe un problème de mise en décharge important que nous nous devons de questionner. Maintenant, la question qui se pose de point de vue comptable est de savoir si cela coûte plus cher d'opérer une incinération ou un compostage urbain? Pour répondre à cette question, cette section propose une analyse du système de la valeur dans une variation de notre situation d'incinération. Cette variation considère le compostage comme méthode pour se débarrasser du déchet. Cette méthode utilise comme intrants un déchet, un service de travail et un capital économique.

[138] Information disponible sur Valtom (syndicat mixte de gestion et traitement des déchets ménagers du Puy de Dôme), consulter le site : http://www.valtom63.fr/wp-content/uploads/2017/01/VALTOMRA2015web.pdf (site consulté le 10 juin 2017).

[139] TEOM : Taxe d'Enlèvement des Ordures Ménagères REOM : Redevance d'Enlèvement des Ordures Ménagères

[140] Information disponible sur WEKA dans le site : http://www.weka.fr/finances-comptabilite/dossier-pratique/pratique-des-finances-territoriales-dt18/connaitre-les-subventions-pour-les-dechets-0425/(site consulté le 10 juin 2017).

La question est alors la suivant : qui va être en charge du processus de compostage urbain ? Ce type de processus peut être potentiellement opéré par les voisins du quartier comme une source de revenue social. Cette préoccupation devra avoir des conséquences économiques en termes d'appropriation de la valeur sur les autres processus déjà décrits.

Nous commencerons par l'examen du système de la valeur d'un petit système décomposable, comme suit :

Système de valeur 13.2.4

	Input				**Output**			
	service travail	*cap*	*compost*	*déchet*				
Ménages	a_{11}	0	0	0	b_{11}	0	0	0
Processus écon A	a_{21}	a_{22}	a_{23}	0	0	b_{22}	0	b_{24}
Processus écon B	a_{31}	a_{32}	0	0	0	b_{32}	0	b_{34}
Compostage	a_{41}	a_{42}	0	a_{44}	0	0	b_{43}	0

Ce schéma intègre les trois formes de processus déjà décrits dans les autres cas (cf. sections 5.4 et 8.2). C'est-à-dire un processus externe, deux processus économiques et un processus de compostage du déchet.

1. La ligne supérieure permet au service du travail, d'être reproduite comme un *fond* avec un taux de reproduction $g_1 = (b_{11}-a_{11})/a_{11}$.

2. Le deuxième processus représente un processus économique comme l'agriculture qui utilise compost (ressource 2) comme input afin d'augmenter un capital économique variable (ressource 3) avec un taux de croissance $g_2 = (b_{22}-a_{22})/a_{22}$.

3. Le troisième processus explore un processus économique comme le métabolisme urbain qui permet d'augmenter un capital économique (ressource 3) avec un taux de croissance $g_3 = (b_{32}-a_{32})/a_{32}$.

4. La ligne inférieure représente un processus de compostage urbain, les signes et les valeurs des prix qui accompagnent les coefficients donneront diverses significations selon l'existence d'un paiement ou d'un système de compostage bénévole.

Les processus 4 de l'actuel système de la valeur qui décrit le compostage et le quatrième processus du système de valeur qui représente l'incinération dans la section 13.2.2 présentent des activités revendiquées par des acteurs distincts de la société. D'un côté Syctom favorise l'incinération des déchets pour générer de l'énergie et d'autre côté un groupe des citoyens et des organisations qui prônent le compostage urbain comme mesure pour se débarrasser d'un pourcentage du déchets. Le processus 4 du système de valeur 13.2.4 symbolise une économie plus *vertueuse*, orientée d'une part vers la protection d'un patrimoine naturel et d'une autre, vers la réalisation d'un surplus qui sera demandé ou distribué par le propriétaire du processus.

Par commodité, nous définirons que dans l'opération de compostage du système 13.2.4, p_1a_{41} représente le salaire p_1 multiplié par la quantité de travail utilisé a_{41}, p_2a_{42} représente le capital utilisé au prix p_2 multiplié par la quantité du capital utilisé a_{42} dans le métabolisme urbain, p_4a_{44} représente le coût monétaire du compostage qui est égal à la subvention p_4 multipliée par la quantité compostée a_{44}, p_3b_{43} représente le prix du compost p_3 multipliée par la quantité du déchet compostable b_{43}.

$$[p_1a_{41}+p_2a_{42}+0-p_4a_{44}](1+r)= [0+0+p_3b_{43}+0] \quad (13.2.4.1)$$

Dans une première variation du compostage, la fonction du processus est de se débarrasser du déchet de manière à symboliser une économie *verteueuse*, c'est-à-dire qui ne cherche pas à faire de surplus, ainsi p_3=0. On peut énoncer brièvement l'hypothèse que les déchets ultimes ne sont pas représentés explicitement dans notre exemple, mais qu'ils ont été envoyés dehors du système.

Pour maximiser la lisibilité, nous prenons quelques exemples numériques. Considérons le schéma (4x4) ci-dessous ; A et B sont :

$$\begin{bmatrix} 6 & 0 & 0 & 0 \\ 2 & 5 & 12 & 0 \\ 2 & 5 & 0 & 0 \\ 2 & 5 & 0 & 15 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 6 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 7.5 & 0 & 5 \\ 0 & 7.5 & 0 & 10 \\ 0 & 0 & 12 & 0 \end{bmatrix} \quad (13.2.4.2)$$

Le premier processus indique simplement le renouvellement d'un *fond* de travail. La deuxième ligne formalise un processus comme l'agriculture qui utilise un service du travail, du capital et du compost (ressource 3) afin de générer le capital. La troisième ligne représente la capacité d'augmenter le capital économique (ressource 2) avec un taux de croissance g maximum de 50% par période. La dernière ligne indique le compostage du déchet (ressource 4), avec l'utilisation d'un capital (ressource 2) afin de générer du compost (ressource 3).

Pour $g_3 = (b_{32}-a_{32})/a_{32} = 50\%$, on obtient les prix en transposée, $p = [0, 0.97, 0.1, -0.24]$

Dans cette variation le service du travail devient gratuit avec un p_1 égal à zéro. Ensuite le vecteur propre $\mathbf{y}$ associé à g_3=50% n'est pas négatif. Cela signifie qu'en partant d'un vecteur d'activité initial $y_0 = [1, 0, 0, 0]$, le parcours dynamique de processus permettra le seul renouvellement du travail (ressource 1). Cela signifie qu'aucun évolution soutenable du système vers un stade d'équilibre ne sera pas possible.

Prenons, l'analyse des solutions de la quatrième ligne qui représente le compostage. Nous pouvons faire l'hypothèse que le prix pour les déchets ultimes dans les *outputs* est égal à zéro. Ensuite nous voulons analyser les intrants et les sorties de manière comptable comme suit :

$$[0*2+0.97*5+0.1*0-0.24*15](1+r)= [0+0+0.1*12+0] \quad (12.2.4.3)$$

Étant donné cette structure, du point de vue comptable, on peut la représentér comme suit : $[1.25](1+r)=[1.2]$. Donc r devra être égal à -0.04 pour permettre cette égalité. En matière comptable, nous pouvons dire que le processus de compostage va générer une perte du capital économique. Cette perte pourrait être représentée de deux façons.

La première manière de représenter cette perte est de considére qu'il y a eu un paiement unitaire direct pour le service de compostage, représenté par $p_4 a_{44}$. En input, le prix p_4 représente un paiement pour le service de compostage avec un taux de retour égal à $1+r$. Cette situation génèrera une perte du point de vue comptable pour les propriétaires des processus. Ensuite, cette perte ne permettra pas de financer le fonctionnement du processus. Dans ce cas, la relation entre r et le paiement est très complexe. Pour pouvoir étudier des solutions, il convient de revenir à notre convention précédente qui consistait à donner aux citoyens la responsabilité de la gestion du compostage urbain comme mesure pour se débarrasser d'un pourcentage du déchets.

La deuxième manière de représenter cette perte est de proposer une opération de bénévolat pour gérer le processus de compostage qui peut être potentiellement opéré par les voisins du quartier comme une source de revenue social non monétaire.

Ensuite, nous voulons introduire des modifications sur les trois derniers processus du système de valeur comme suit :

$$\begin{bmatrix} 2 & 5 & 6 & 0 \\ 2 & 5 & 0 & 0 \\ 2 & 5 & 0 & 15 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 & 6 & 0 & 5 \\ 0 & 6 & 0 & 10 \\ 0 & 0 & 6 & 0 \end{bmatrix} \quad (13.2.4.4)$$

Le deuxième processus du système 13.2.4.4 représente le métabolisme urbain qui présente la capacité d'augmenter le capital économique (ressource 2) avec un taux de croissance g maximum de 20% par période. La dernière ligne indique le compostage du déchet (ressource 4), avec l'utilisation du capital (ressource 2) afin de générer du compost (ressource 3).

Pour $g_3 = (b_{32}\text{-}a_{32})/a_{32} = 20\%$, avec les prix en transposée, p = [0, 0.66, -0.35, -0.43]

Dans cette variation le travail devient gratuit avec un p_1 égal à zéro. Ensuite le vecteur propre **y** associé à g_3=20% n'est pas négatif. Cela signifie qu'en partant d'un vecteur d'activité initial y_0 = [1, 0, 0, 0], le parcours dynamique de processus permettra le renouvellement de travail à un taux de 20% par période. En suivant l'équation 13.2.4.1, de manière comptable la structure peut être représenté comme suit : [-3.15](1+r)=[-2.1]. Donc r devra être égal à -0.33 pour permettre cette égalité qui du point de vue comptable va générer une perte du capital économique.

Maintenant, nous voulons inclure dans les variations deux nouveaux processus : la production d'énergie et l'agriculture urbaine qui utilise le compost produit à proximité par le processus de compostage. Ainsi, le système décomposable sera représenté dans le système 13.2.5.

Système de valeur 13.2.5

	Input						**Output**					
	service											
	travail	*énergie*	*alim*	*cap*	*compost*	*déchet*						
Ménages	a_{11}	a_{12}	0	0	0	0	b_{11}	0	0	0	0	0
Production énergie	a_{21}	0	0	a_{24}	0	0	0	b_{22}	0	0	0	0
Agriculture	a_{31}	0	0	0	0	0	0	0	b_{33}	b_{34}	0	0
Métabolisme urbain	a_{41}	a_{42}	a_{43}	a_{44}	0	0	0	0	0	b_{44}	0	b_{46}
Agriculture urbaine	a_{51}	0	0	0	a_{55}	0	0	0	b_{53}	b_{54}	0	0
Compostage	a_{61}	0	0	0	0	a_{66}	0	0	0	0	b_{65}	0

Comme dans notre dernier exemple, nous définirons que dans l'opération de compostage du système 13.2.4.5, p_1a_{61} représente le salaire de travail p_1 multiplié par la quantité de travail utilisé a_{61}, p_6a_{66} représente le coût monétaire de compostage p_6 multiplié par la quantité compostée a_{66} et finalement p_5b_{65} représente le prix du compost p_5 multipliée par la quantité du déchet compostable b_{65}.

$$[p_1a_{61}+0+0+0+0+p_6a_{66}](1+r)= [0+0+0+0+p_5b_{65}+0] \qquad (13.2.4.5)$$

Maintenant, nous allons calibrer notre modèle avec de données de la région île-de-France. Considérons le schéma (6x6) ci-dessous ; A et B sont respectivement :

$$\begin{bmatrix} 3.7 & 1.2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0.5 & 0 & 0 & 0.5 & 0 & 0 \\ 0.1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 2.9 & 1.3 & 2.2 & 0.9 & 0 & 0 \\ 0.1 & 0 & 0 & 0 & 0.4 & 0 \\ 0.1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.4 \end{bmatrix} \quad \begin{bmatrix} 3.7 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1.5 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1.5 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1.35 & 0 & 1.1 \\ 0 & 0 & 0.7 & 0.2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0.4 & 0 \end{bmatrix} \qquad (13.2.4.6)$$

Nous avons un métabolisme urbain avec $g_4 = (b_{44}\text{-}a_{44})/a_{44} = 50\%$ et les prix en transposée, p = [0.02, 0.11, -0.31, 0.47, -0.45, -0.65].

Dans cette variation le travail devient non gratuit avec un w de 0.02. Ensuite le vecteur propre **y** associé à g_4 n'est pas négatif. Cela signifie qu'en partant d'un vecteur d'activité initial y_0 = [0.15, 0.12, -0.21, 0.12, 0.7, 0.49], le parcours dynamique de processus permettra une accumulation du capital économique (ressource 4) à un taux de 50% par période, avec une génération du déchet (ressource 6). Comme dans le cas précédent, cela signifie qu'aucun évolution soutenable de processus vers un un stade d'équilibre ne sera pas possible.

Faisons maintenant, l'analyse des solutions de la sixième ligne qui représente l'incinération. Nous pouvons faire l'hypothèse que le prix pour les déchets ultimes dans les outputs est égal à 0. Ensuite nous voulons analyser les intrants et les sorties de manière comptable comme suit :

$$[0.02*0.1+0.11*0-0.31*0+0.47*0-0.45*0-0.65*0.4](1+r)=[0.02*0+0.11*0-0.31*0+0.47*0-0.45*0.4-0.65*0] \quad (13.2.4.6)$$

Étant donné cette structure, on peut l'écrire du point de vue comptable comme suit : [-0.2548](1+r)= [-0.18]. Donc r devra être égal à -29% pour permettre cette égalité. Du point de vue comptable, nous pouvons dire que le processus de compostage va générer une perte du capital économique. Cette perte pourrait être représentée comme le paiement unitaire direct pour le service de compostage du déchet $p_6 a_{66}$.

Maintenant, nous voulons diminuer la capacité d'un métabolisme urbain à générer de la ressource capital (ressource 4). Donc la quatrième ligne du système de valeur sera exprimée comme suit :

$$[0*0.1+0.1*0-0.31*0+0.47*0-0.45*0-0.62*0.4](1+r)=[0*0+0.1*0-0.310*0+0.47*0-0.45*0.4-0.62*0] \quad (13.2.4.7)$$

Nous avons un métabolisme urbain avec un nouveau $g_4 = (b_{44}-a_{44})/a_{44} = 20\%$ et les prix en transposée, p = [0, 0.1, -0.31, 0.47, -0.45, -0.62]. Les vecteurs et valeurs propres sont précisés en annexe XIII.C.

Le vecteur propre $\boldsymbol{y}$ associé à g_4=20% est égal à y_0 = [0, 0.1, -0.31, 0.47, -0.45, -0.62], le parcours dynamique des processus permettra une accumulation du capital économique (ressource 4) à un taux de 20% par période, avec une génération de plus en plus rapide du déchet. Ensuite du point de vue comptable la structure peut être représentée ainsi : [-0.245](1+r)=[-0.18]. Donc r devra être égal à -26% pour permettre cette égalité. Du point de vue comptable, nous pouvons dire que le processus de compostage va générer une perte du capital économique. Cette perte pourrait être représentée comme le paiement unitaire direct pour le service de compostage du déchet $p_6 a_{66}$.

On peut présenter brièvement le fonctionnement du système de subvention du compostage urbain. Considérons le cas particulier du territoire du Grand Lyon.

2486 € (coût total du projet de compostage en pied d'immeuble) [141] = 1243 € (montant subvention ADEME) + 1243 € (montant payé par les voisins)

Nous pouvons constater que 50% du coût total est payé par l'ADEME il y a donc une subvention de 50 % équivalent à 1243€ HT. Ainsi, la valeur négative de r égale à -26% est en concordance avec la nécessité de maintenir une subvention.

[141] Information disponible sur le site de la Métropole de Lyon, consulter le site : *https://www.grandlyon.com/delibs/pdf/Conseil/2016/03/21/DELIBERATION/2016-1118.pdf* (site consulté le 12 juin 2017).

13.2.5. Système de la valeur et taux de rendement inégaux

Nous avons évoqué dans les paragraphes précédents la présumée égalisation des taux de rendements (ou taux de profit) des processus. Mais il n'y avait aucun mécanisme formel qui assurait la même rentabilité pour tous les processus, par exemple entre l'agriculture et l'incinération du déchet. Donc, Même si dans un système en concurrence l'égalisation des taux de profits est supposée logique, ce résultat n'est pas forcément vérifié empiriquement. Maintenant, nous pouvons relâcher cette hypothèse de égalisation. Ensuite concernant les prix, le système de valeur représente les prix relatifs qui servent de paramètres de répartition. Ils sont contrôlés par des classes distinctes de propriétaires en conflit sur les ressources qu'ils tirent des divers processus (Perrings, 1987). O'Connor en 1993 propose l'existence de taux de rendement différents , non parmi les ressources, mais parmi les sous-ensembles de processus de production.

Soit Π une matrice diagonale aux éléments non nuls (r_1, r_2, ..., r_N) étant disposés dans la diagonale principale et I la matrice identité. Nous pouvons écrire l'équation de valeur comme le propose Perrings (1987) : $A(\mathrm{I}+\Pi)p = Bp$ qui permet de relier le taux de profit avec la ressource. Maintenant, nous voulons relier directement le taux de profit avec les processus, donc nous écrivons : $(\mathrm{I}+\Pi)Ap = Bp$ comme préconise O'Connor (1993).

Un système décomposable sous le formate de Perrings sera présenté. Ce schéma intègre les trois formes de processus décrits dans notre classement du chapitre VIII, c'est-à-dire un processus externe qui assure la reproduction de la force du travail *(w*=wage*)* avec un taux de profit Π_w, un processus économique avec un taux de profit Π_c et un processus d'incinération (*i*) du déchet avec un taux de profit Π_i (cf. section 5.3.1).

$$\mathrm{A}\begin{bmatrix}[\mathrm{I}+\Pi_w] & . & . \\ . & [\mathrm{I}+\Pi_c] & . \\ . & . & [\mathrm{I}+\Pi_i]\end{bmatrix}\begin{bmatrix}p_w \\ p_c \\ p_i\end{bmatrix} = B\begin{bmatrix}p_w \\ p_c \\ p_i\end{bmatrix} \qquad (13.2.5.1)$$

La première ligne du système 13.2.5.1 montre un processus donneur, qui est associé au travail *w (wage).* Si, la structure de A et B est décomposable, cela signifie que ce profit Π_w est isolé des autres équations du système. Nous écrivons la ligne correspondante comme suit :

$$A[\mathrm{I}+\Pi_w]p_w = Bp_w \qquad (13.2.5.2)$$

Maintenant, nous avons deux sous-systèmes de relations de valeur, pour les lignes qui représentent les processus de consommation des matières premières et de gestion du déchet respectivement, qui peuvent être écrites comme suit (cf. section 5.3.1):

$$A = \begin{bmatrix}a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22}\end{bmatrix} \quad B = \begin{bmatrix}b_{11} & b_{12} \\ b_{21} & b_{22}\end{bmatrix} \quad [\mathrm{I}+\Pi_c] = (1+r_1) \quad [\mathrm{I}+\Pi_i] = (1+r_2) \quad p_c = p_1 \quad p_i = p_2 \qquad (13.2.5.3)$$

L'égalité 13.2.5.3 peut être écrit comme suit :

$$(1+r_1)\left[a_{11}p_1+a_{12}p_2\right]=b_{11}p_1+b_{12}p_2 \qquad (13.2.5.4)$$
$$(1+r_2)\left[a_{21}p_1+a_{22}p_2\right]=b_{21}p_1+b_{22}p_2$$

Ensuite nous pouvons exprimer en fonction de Ψ les différents taux de rendement I et Π comme suit:

$$\Psi=\mathrm{I}+\Pi=\begin{bmatrix}1+r_1 & 0\\ 0 & 1+r_2\end{bmatrix} \qquad (13.2.5.5)$$

Il peut être utile de donner une illustration de la procédure algébrique conduisant à la détermination de Ψ . En réarrangeant les équations précédentes pour déterminer les prix, on obtient :

$$(1+r_1)\left[a_{11}p_1+a_{12}p_2\right]=b_{11}p_1+b_{12}p_2 \Rightarrow (1+r_1)a_{11}p_1+(1+r_1)a_{12}p_2=b_{11}p_1+b_{12}p_2$$
$$\Rightarrow\left[(1+r_1)a_{11}-b_{11}\right]p_1=\left[(1+r_1)a_{12}-b_{12}\right]p_2 \qquad (13.2.5.6)$$

À partir de l'équation précédente, en réarrangeant et en supposant que p_1 et $p_2 \neq 0$, on obtient p_2/p_1 :

$$(p_2/p_1)=-\left[(1+r_1)a_{12}-b_{12}\right]/\left[(1+r_1)a_{11}/b_{11}\right] \qquad (13.2.5.7)$$

De la même manière, on peut réarranger les équations précédentes pour éliminer les prix.

$$(1+r_2)\left[a_{21}p_1+a_{22}p_2\right]=b_{21}p_1+b_{22}p_2 \Rightarrow (1+r_2)a_{21}p_1+(1+r_2)a_{22}p_2=b_{21}p_1+b_{22}p_2 \qquad (13.2.5.8)$$
$$\Rightarrow\left[(1+r_2)a_{21}-b_{21}\right]p_1=\left[(1+r_2)a_{22}-b_{22}\right]p_2$$

À partir de l'équation précédente, en réorganisant et en supposant que p_1 et $p_2 \neq 0$, on obtient à nouveau p_2/p_1 :

$$(p_1/p_2)=-\left[(1+r_2)a_{22}-b_{22}\right]/\left[(1+r_2)a_{21}/b_{21}\right] \qquad (13.2.5.8)$$

Ainsi, la relation de prix (p_1/p_2) aura la structure suivante :

$$(1+r_1)\left[a_{11}-a_{12}\right]/\left[(1+r_1)a_{11}-b_{11}\right]=\left[(1+r_2)a_{22}-b_{22}\right]/\left[(1+r_2)a_{21}-b_{21}\right] \qquad (13.2.5.9)$$

À partir de l'équation précédente, on obtient :

$$(1+r_1)\left[a_{12}-a_{12}\right]\left[(1+r_2)a_{21}-b_{21}\right]=\left[(1+r_2)a_{22}-b_{22}\right]\left[(1+r_1)a_{11}-b_{11}\right] \qquad (13.2.5.10)$$

Ensuite, nous pouvons exprimer $(1+r_1)=\Psi_1$ et $(1+r_2)=\Psi_2$ et en réarrangeant l'équation précédente, nous obtenons :

$$\left[a_{11}a_{22}-a_{12}a_{21}\right]\left[\Psi_1\Psi_2\right]-\left[a_{11}a_{22}-a_{12}a_{21}\right]\Psi_1-\left[b_{11}a_{22}-b_{12}a_{21}\right]\Psi_2-\left[b_{11}b_{22}-b_{12}b_{21}\right]=0 \qquad (13.2.5.11)$$

L'expression $\left[a_{11}a_{22}-a_{12}a_{21}\right]$dans 13.2.5.11 correspond au déterminant de la matrice A, en supposant que $det\boldsymbol{A}$=0, on obtient:

$$\Psi_1\Psi_2-\alpha\Psi_1-\beta\Psi_2-\gamma=0 \qquad (13.2.5.12)$$

$$\alpha = \frac{[a_{11}b_{22} - b_{21}a_{12}]}{[a_{11}b_{22} - a_{21}a_{12}]}; \beta = \frac{[b_{11}a_{22} - a_{21}b_{12}]}{[a_{11}a_{22} - a_{21}a_{12}]}; \gamma = \frac{[b_{11}b_{22} - b_{21}b_{12}]}{[a_{11}a_{22} - a_{21}a_{12}]} = \frac{\det B}{\det A} \quad (13.2.5.13)$$

Nous pouvons réarranger l'expression pour trouver la forme d'une hyperbole.

Maintenant, pour maximiser la lisibilité, nous prenons les trois cas déjà étudiés, c'est-à-dire, les systèmes de valeur qui considèrent tout d'abord une mise en décharge, puis l'incinération et finalement le compostage. Considérons le schéma (3x3) de 13.2.5.1, la première ligne du système de valeur 13.2.5.1 est la même pour les trois cas d'étude. Il montre un processus donneur, qui est associé au travail *w (wage)*. Si, la structure A et B est décomposable , cela signifie que le taux ce profit Π_w est isolé des autres équations du système. Nous écrivons la ligne correspondante comme suit : $6[\mathrm{I} + \Pi_w]p_w = 6p_w$, donc Π_w =-I.

La valeur Π_w=-I représente le taux de retour des processus de la première ligne du système de valeur 13.2.5.15 qui est la même pour les trois cas d'étude.

Ensuite nous écrivons la deuxième ligne du système 13.2.5.1 qui représente le métabolisme urbain avec la capacité d'augmenter le capital économique; ainsi que la dernière ligne, qui indique respectivement la mise en décharge, l'incinération et le compostage du déchet, comme suit :

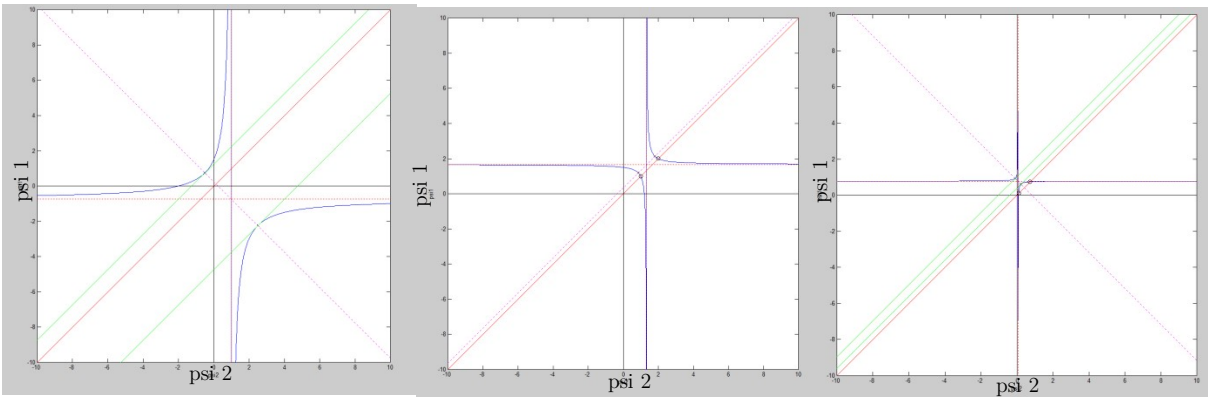
Mise en décharge (*d*) Incinération (*i*) Compostage (*c*)

$$A_d = \begin{bmatrix} 10 & 0 \\ 15 & 10 \end{bmatrix} \quad B_d = \begin{bmatrix} 15 & 15 \\ 0 & 10 \end{bmatrix} \quad A_i = \begin{bmatrix} 10 & 12 \\ 5 & 15 \end{bmatrix} \quad B_i = \begin{bmatrix} 15 & 15 \\ 0 & 12 \end{bmatrix} \quad A_c = \begin{bmatrix} 13 & 0 \\ 5 & 15 \end{bmatrix} \quad B_c = \begin{bmatrix} 15 & 15 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Nous pouvons montrer les relations graphiques entre $\Psi_1(\mathrm{psi}_1)$ et $\Psi_2(\mathrm{psi}_2)$ en pourcentage de la manière suivante :

Graphique 13.2.5 : $\Psi_1(\mathrm{psi}_1)$ et $\Psi_2(\mathrm{psi}_2)$ en pourcentage (10=100%)

Mise en décharge (*d*) Incinération (*i*) Compostage (*c*)



α =1; β =-0.75; γ =1.5 α =1.33; β =1.66; γ =2 α =0.066; β =0.769; γ =0.0769

Source : L'auteur

La résultante de ces graphiques agissant en direction opposée sera toutefois différente d'un système de la valeur à l'autre. Dans le cas général, la relation entre Ψ_1 (psi_1) et Ψ_2 (psi_2) est très complexe. Pour pouvoir étudier leur propriétés, il convient de revenir à notre convention précédente qui consistait à exprimer $(1+r_1)=\Psi_1$ et $(1+r_2)=\Psi_2$. De plus, la courbe de Ψ_1 a été représentée par les deux branches d'une hyperbole équilatère qui a pour asymptotes l'axe de Ψ_2 et la parallèle à l'axe de Ψ_1.

Malheureusement, on ne peut pas dire grand-chose sur la forme de l'hyperbole. Tout au plus on peut affirmer que : 1) Les courbes du premièr et troisième graphique donnent des résultats similaires. La signification de ces résultats est assez évidente, il conviendra de réutiliser le concept des produits fondamentaux et non fondamentaux du chapitre V de la thèse. Considérons tout d'abord le cas particulier où les déchets sont déposés dans une mise en décharge (graphique de gauche). Un produit fondamental (capital) devra avoir un Ψ_2 inférieur à 1, ce qui est équivalent à 10% pour le processus du métabolisme urbain, autrement dit, la productivité du produit fondamental ne dépassera pas 10% avec r_2=0.09. Au moment où la valeur de Ψ_2 s'approche de 10, ce qui équivaut à 100%, avec r_2=0.9, le prix du produit fondamental est associé à une valeur positive de Ψ_1. Quand la valeur de Ψ_2 dépasse 1 , ce qui équivaut à 10%, la valeur de Ψ_1 devient négative, ce qui indique le cas d'une marchandise non fondamentale. Donc, s'il s'agit d'un produit non-fondamental, le Ψ_2 devra être entre 1 et 10 équivalant à 10% et 100% (Sraffa, 1970). Le compostage (graphique droit) suit le même raisonnement : ainsi, quand la valeur de Ψ_2 dépasse 0%, la valeur de Ψ_1 devient négative, cela indique le cas d'une marchandise non fondamentalle. Donc, s'il s'agit d'un produit non-fondamental, le Ψ_2 devra être entre 0% et 100% ; 2) L'hyperbole qui représente le cas d'incinération (graphique centre) agit en direction opposée aux deux autres cas. Effectivement, le processus métabolisme urbain devra avoir un Ψ_1 proche de la valeur 1.8 équivalant à 18 % pour avoir un processus d'incinération avec un Ψ_2 négatif avec un r_2 négative, autrement dit une valeur positive de Ψ_2 sera générée avec une valeur $\Psi_1 \neq 1.8$.

13.3 Indicateurs d'économie circulaire : Ellen MacArthur et Yifang

Après avoir exposé quelques éléments de diagnostics généraux, nous voulons nous concentrer sur le traitement des déchets azotes et trouver les piliers et les enjeux le plus importants concernant. Ce choix peut être dicté l'importance d'obtenir des indicateurs physiques sur des questions comme l'épuisement et le bouclage des ressources.

De façon assez surprenante, les statistiques relatives à la circulation de l'énergie dans le domaine français sont abondantes, mais ne donnent pas directement les informations dont nous avons besoin sur la variation de l'intensité de l'utilisation de l'azote dans le métabolisme agricole et industriel. On note néanmoins que le travail d'Esculier en 2016, permet d'analyser la variation dans l'utilisation de l'azote en utilisant d'une part, le cadre conceptuel de trois variations, proposées dans le chapitre VIII, et d'autre part les indicateurs de circularité *CL* et *MCI* qui ont été présentés et sélectionnés aux chapitres IX et X.

13.3.1. Première variation : Mise en décharge.

On pourrait se demander quel type d'indicateur peut être utilisé pour mesurer un bouclage de flux. Ce qui vient d'être dit autorise immédiatement les hypothèses qui sous-tendent l'existence d'une boucle.

D'abord, nous affirmons que le modèle de Yifang *et al.* (2007) mesure directement un bouclage de flux de matière et d'énergie parce qu'il considèr explicitement des processus de réversion dans les flux en cascade. Cet indicateur utilise une mesure des flux en cascade parmis d'autres indicateurs comme le *Footprint* mais il propose en plus un indicateur de bouclage β où une valeur de *CL*=1 indique un haut développement systémique d'économie circulaire.

Nous pouvons ainsi vérifier l'existence d'une boucle dans un système composé de quatre processus distincts, impliquant l'usage et la production de ressources et du déchets matériels distincts.

Pour explorer les circularités ou bouclages des processus, les équations ci-dessus (plus de detaillées aux chapitre IX) montrent les résultats pour une boucle ouverte qui peut être mesurée en utilisant α comme le ratio de récupération et de stockage du déchet, et β comme le ratio qui indique la circularité du système, i.e. il mesure la quantité du déchet qui peut être utilisé pour un processus de traitement ou valorisation en utilisant l'indicateur *CL* proposé par Yifang.

$$\alpha_i = \begin{cases} \dfrac{X_i^u}{S_i} = 0 & i \in 1,\Lambda\ ,k \\ \dfrac{R_i}{S_i} = 0 & i \in k+1,\Lambda\ ,m \end{cases} \tag{13.3.1.1}$$

$$\beta_i = \begin{cases} \dfrac{p_i^u}{p_i^{u_o}} \\ \dfrac{x_{i1}^{rl}}{R_i}.\dfrac{p_1^l}{p_1^{l_o}} + \dfrac{x_{i2}^{rl}}{R_i}.\dfrac{p_2^l}{p_2^{l_o}} + \Lambda\ + \dfrac{x_{il}^{rl}}{R_i}.\dfrac{p_l^l}{p_l^{l_o}} = 0 \end{cases} \tag{13.3.1.2}$$

Nous pouvons constater immédiatement que la première variation ne produit pas de récupération, de valorisation ou de recyclage des déchets car α =0 et β=0. En conséquence, la valeur de *CL*=0 indique une absense de développement systémique d'économie circulaire et représentée une boucle ouverte.

Il peut être utile d'utiliser autre indicateur conduisant à la détermination du bouclage de flux. On peut proposer l'utilisation du *MCI (Le Material Circularity Indicator).* Nous affirmons que l'approche de la fondation Ellen MacArthur mesure directement un bouclage des flux parce qu'elle considère explicitement des processus de réversions dans le flux en cascade. Comme nous l'avons déjà mentionné au chapitre X, cet indicateur utilise une mesure des flux en cascade, comme ce que proposent les indicateurs de l'ADEME, mais il propose en plus un indicateur de bouclage *MCI* qui permet de mesurer le bouclage systémique en pourcentage.

L'indicateur *MCI*, pourrait capter la circularité des flux matériels du processus économique. Nous allons maintenant vérifier que l'absence de circularité dans une mise en décharge constitue une raison valable pour obtenir *MCI*=0.

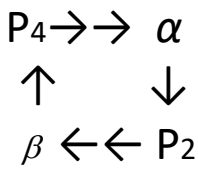
13.3.2. Deuxième variation : Incinération du déchet.

Supposons maintenant la valorisation énergétique de la ressource 6 (déchet) à travers un processus économique comme l'incinération des déchets dont la fonction est de produire un capital économique (ressource 2, l'énergie), en utilisant un déchet économique (ressource 6).

Le cadre des indicateurs proposées par Yifang *et al.* (2007) permet de mesurer le bouclage des processus en utilisant les prix déjà calculées dans la section 13.2 et l'indicateur de circularité *CL* de Yifang.

La figure ci-dessus montre le circuit des flux qui peut être mesuré en utilisant α et β comme les ratios qui indiquent la circularité du système, voir figure suivante.

Figure 9.8 : Circuit des flux pour l'incinération du déchet



Les équations ci-dessus montrent les résultats par une boucle d'énergie qui peut être mesurée en utilisant *CL*.

$$CL_{énergie} = 0.19 \qquad 3.3.2.1)$$

La valeur de *CL* est comprise entre 0 et 1. La valeur 19% (énergie) représente une boucle assez ouverte, ce résultant parait indiquer la même direction que celui proposé par Saveyn *et al* (2016) où le ratio d'énergie issue de l'incinération est de 26%. Cet ratio peut être attribué à la dissipation calorique, on peut trouver plus de renseignement en annexe XIII.E.

Le *Material Circularity Indicator (MCI)*, proposé par la fondation Ellen MacArthur, captera la *valorisation des déchets* qui utilise la ville comme *fond*, c'est-à-dire dont la fonction est de produire un capital économique (ressource 2, l'énergie) qui va être utilisé par le processus 1 et 4 et un déchet non valorisable qui n'a pas été consideré dans le système (cf. la matrice correspondante dans le chapitre VIII).

L'indicateur de flux linéaire *LFI* mesure la quantité des matériaux qui parcourent un flux linéaire, comme suit :

$$LFI = \frac{V+W}{2M+\frac{W_F - W_C}{2}} = 0.42 \qquad 3.3.2.2)$$

L'index *MCI* ou indicateur d'économie circulaire a été construit à partir du LFI, et un facteur *X* de taux de profit sur le cycle de vie du produit.

$$MCI = 1 - LFI \cdot F(X) = 0.61 \qquad 3.3.2.3)$$

La valeur du *MCI* est comprise entre 0 et 1. La valeur 61% représente une boucle plus fermée que la mesure pour l'indicateur *CL,* on peut attribuer les différences à l' algorithme de calcul des indicateurs.

13.3.3. Troisième variation : Compostage du déchet urbain

Nous avons évoqué dans les paragraphes précédents la possibilité, d'un changement du système linéaire en un système circulaire. On peut annoncer brièvement, les hypothèses qui sous-tendent un bouclage de flux à travers du compostage du déchet urbain.

Cette structure peut être classifiée selon notre classement du chapitre VIII comme un flux circulaire de type 3 ou comme un type de recyclage du déchet externe si nous utilisons le classement proposé par Jason Moore au chapitre VI.

Le indicateurs *CL* calcule le bouclage dans un système, en utilisant quatre processus distincts, impliquant l'usage de ressources et du déchets matériels distincts. Les processus sont représentés dans *le petit cycle et le cycle moyen.*

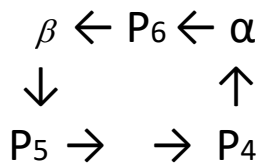
Le petit cycle : Il s'agit de processus piloté par l'homme du début à la fin, *par exemple la manufacture des biens et des services* (O'Connor *et al* 2009). Les processus peuvent être démarrés et arrêtés quand l'on veut, cf. chapitre II du rapport.

Les processus sont représentés dans *le cycle moyen* : ils s'agit des processus partiellement gérés par la nature, comme l'agriculture, processus qui peuvent être considérés comme constituant *la nature domestiquée*. Ce type de processus est piloté par l'homme, mais il n'est pas maîtrisé par celui-ci du début à la fin. Il existe beaucoup de variables déterminées par des éléments exogènes au système, cf. chapitre II.

Supposons que le processus économique 5, l'agriculture urbaine, utilise directement une partie de la ressource 5 (compost) comme *input* dans la production de la ressource 3 (aliment) qui va être utilisé par le métabolisme urbain (processus 4) .

Les équations ci-dessous montrent une boucle qui peut être mesurée en utilisant α comme le ratio de récupération et de stockage du déchet, et β comme le ratio qui indique la circularité du système, i.e. il mesure la quantité du déchet végétal urbain qui peut être utilisée par l'agriculture urbaine (processus 5), voir figure ci-dessous :

Figure 9.9 : Circuit des flux pour le compostage du déchet



Vérifions maintenant l'hypothèse que les flux peuvent être circulaires à travers les indicateurs suivants:

$$\alpha_i = \begin{cases} \dfrac{X_i^u}{S_i} & i \in 1,\Lambda\ ,k \\ \dfrac{R_i}{S_i} = 0.37 & i \in k+1,\Lambda\ ,m \end{cases} \qquad (13.3.3.1)$$

$$\beta_i = \begin{cases} \dfrac{p_i^u}{p_i^{u_o}} \\ \dfrac{x_{i1}^{rl}}{R_i}.\dfrac{p_1^l}{p_1^{l_o}} + \dfrac{x_{i2}^{rl}}{R_i}.\dfrac{p_2^l}{p_2^{l_o}} + \Lambda + \dfrac{x_{il}^{rl}}{R_i}.\dfrac{p_l^l}{p_l^{l_o}} = 1 \end{cases} \qquad (13.3.3.2)$$

$$CL = \sum_i \frac{S_i.p_i^s}{\sum_j S_j p_j^s}.cl_i = 0.24 \qquad (13.3.3.3)$$

La valeur de *CL* est comprise entre 0 et 1. La valeur 24% représente une boucle assez ouverte. On peut trouver plus de renseignements en XIII.E.

Le *MCI* capterait le bouclage des flux matériels du processus économique 6 le compostage urbain, en utilisant directement une partie de la ressource 6 comme *input* par la production de la ressource 5 (compost).

L'indicateur de flux linéaire *LFI* mesure la quantité des matériaux qui parcourent un flux linéaire.

$$LFI = \frac{V+W}{2M + \dfrac{W_F - W_C}{2}} = 0{,}36 \qquad (13.3.3.4)$$

L'index *MCI* ou indicateur d'économie circulaire a été construit à partir du *LFI* et un facteur X de taux de profit sur le cycle de vie du produit.

$$MCI_c = 1 - LFI \cdot F(X) = 0{,}67 \qquad (13.3.3.5)$$

La valeur du *MCI* doit être comprise entre 0 et 1. La valeur 67% représente une boucle assez fermé.

Considérons pour terminer que dans notre modèle, à partir de 1.1 unités des déchets seulement 0.4 ont été compostés afin d'être reutilisés comme *input* dans l'agriculture urbaine. Donc le ratio donné par l'indicateur du *MCI* est assez proche du ratio calculé directement comprise entre 0.4 et 1.1. De plus, nous pouvons trouver la quantité d'azote dans ce ratio en utilisant la relation proposée par Cadillon (2002) où le compost des déchets organiques d'origine urbaine constitue un produit organique qui doit venir en complément du marché des fumiers provenant des bovins, cela doit être un produit organique de faible coût. Du point de vue de la teneur en matière organique, un compost fabriqué à partir d'ordures ménagères constitue un bon équivalent par rapport an fumier de bovins, et une tonne de compost apporte 5.9 Kg d'azote (Cadillon *et al.* 2002).

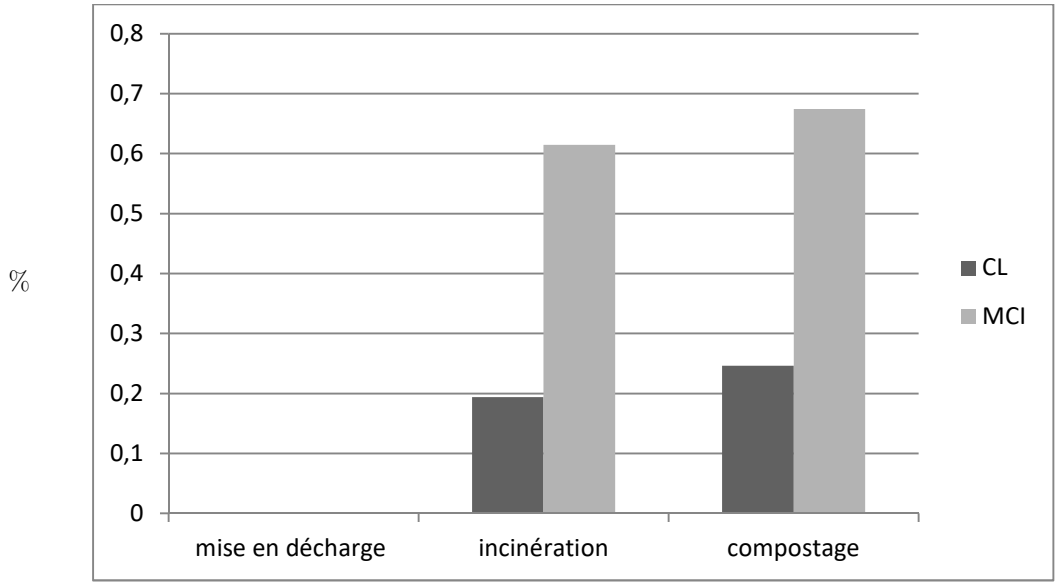
13.4 Conclusion

Avenir de l'usine des ordures ménagères Ivry-Paris XIII : Quel projet pour demain, lorsque la conjoncture territoriale et les outils d'évaluation évoluent ?– Telle était la question posée dans la cinquième partie de cette thèse. Pour y répondre, une approche comportant de trois dimensions et de trois variations est révélée pertinente. Nous avons de plus utiliser des outils d'évaluation, dont les indicateurs de circularité *CL* et *MCI* qui ont été présentés et sélectionnées aux chapitres IX et X. Nous sommes conscients que les bases de données ne sont pas spécialement adaptées aux questions posées par les modèles de type *input-output* de l'environnement ou les modèles de production jointe. C'est pourquoi nous proposons d'utiliser une quantité limite des indicateurs adaptée aux basses données disponibles.

Les résultats montrent que la variation (*mise en décharge*) ne produit pas de récupération, de valorisation ou de recyclage des déchets, i.e. $\alpha = 0$ et $\beta = 0$. En conséquence, la valeur de $CL=0$ logiquement représente une boucle ouverte.

Cette évolution des ressources dans un scénario sans bouclage de flux de matière, a été explorée à travers une itération des biens dans le temps. Il a permis de catégoriser cette variation de *4cheaps* dans un cadre de production jointe comme une consommation des ressources ou une prédation pure, selon le classement qui a été proposé par Moore en 2015 (cf. chapitre VI).

Graphique 13.4.1 : Comparaison des indicateurs de circularité de Yifang *CL* et Ellen MacArthur *MCI*



Source : L'auteur

La variation qui considère implicitement un bouclage de l'azote dans le compostage a été exploré en utilisant quatre processus distincts de petit cycle, impliquant l'usage de ressources et du déchets matériels distincts. Il a été classifié selon notre classement du chapitre VIII comme un flux circulaire de type 3 ou comme un type de recyclage du déchet interne, si nous utilisons le classement proposé par Jason Moore et on introduit dans le chapitre VI. Les processus sont représentés dans *les cycles petit et*

moyen, et on introduit l'agriculture urbaine comme processus qui utilise directement une partie du déchet végétal urbain comme *input* pour la production de végétaux (aliment).

L'incinération montre un baisse de la circularité du système par rapport au compostage (graphique 13.4.1), la valeur de *CL* est comprise entre 0 et 1. Cet écart s'explique peut être en partie par l'incorporation des processus qui représentent le *cycle moyen*. Il s'agit de processus partiellement gérés par la nature comme le compostage urbain, qui peuvent être considérés comme constituant partie de la nature *domestiquée*. Ces processus sont pilotés par l'homme, mais il ne sont pas maîtrisés par celui-ci du début à la fin, cf. chapitre II.

Comme dans l'indicateur *CL*, les résultats montrent que la mise en décharge ne produit pas de récupération, de valorisation ou de recyclage des déchets donc *LFI* et *MCI* sont égal à 0.

Pour le compostage, utilise directement une partie des déchets comme *input* pour la production de la ressource 6 (compost), l'indicateur du *MCI* capte la circularité des flux matériels du compostage avec un ratio de 67%. On peut remarquer que cet indicateur pourrait capter implicitement le bouclage de certains flux de la production agricole et du métabolisme urbain comme l'utilisation du déchet végétal dans la préparation du sol avec l'incorporation d'azote provenant du compost.

En outre, l'indicateur du *MCI* présente les résultats par une boucle d'énergie en incluant l'incinération des déchets qui utilise la ville comme *fond,* et dont la fonction est de produire de l'énergie qui va être utilisée par les autres processus du système. La valeur de 61% du *MCI* représente une boucle moins serrée que le compostage à cause du processus de valorisation énergétique, pertes potentiellement attribuables à la dissipation de la chaleur. Cependant, il a été compliqué d'utiliser un indicateur des bouclages des flux matériels car il s'agit d'un bouclage énergétique. Pourtant, nous constatons que nous sommes loin de pouvoir inclure toutes les réactions entropiques d'énergie et le bouclage des flux non humaines comme l'eutrophisation ou le flux d'azote, ou comme la pluie acide, en utilisant un indicateur très agrégé.

À ce stade, nous souhaiterions souligner à nouveau combien les différences des résultats entre les indicateurs de *CL* et *MCI* me semblent importants dans les trois variations. Ils ont permis de mettre en valeur les bouclages des flux de matière et d'énergie dans notre périmètre d'étude.

Sur la base des résultats des indicateurs, nos trois variations, correspondent à des configurations variées des flux sur le même territoire. Le fait que les trois cas d'étude soient situés sur le territoire francilien nous permet d'appréhender finalement une formalisation des sept piliers de l'économie circulaire qui ont été proposés par l'Ademe.

Après cette formalisation, une autre phase a été lancée pour répondre aux enjeux prioritaires du bouclage de flux via des cas d'étude représentatifs des situations que l'on peut rencontrer en Île-de-France.

En ce sens, nous avons sélectionné quatre piliers spécifiques qui ont été proposés par les groupes de travail du Livre Blanc de l'économie circulaire du Grand Paris, et qui sont en rapport avec les cycles de la biosphère et avec les piliers proposés par l'Ademe.

Une cartographie proposée par la fédération des entreprises d'insertion d'Île-de-France nous a permis de mettre en place le passage d'une mise en décharge, vers un système d'incinération des déchets qui permet un bouclage de l'énergie.

Le passage de l'incinération vers une variation plus vertueuse de compostage urbain a été réalisé en utilisant un compostage urbain de proximité (bénévole) avec un taux de profit Sraffien. Comme l'a dit Cadillon (2002), nous pouvons constater que le prix de vente du compost pose un problème d'équilibre financier dans le système de la valeur du compostage et donc, éventuellement que des subventions seront nécessaires à sa bonne marche. De fait, la tonne de compost écoulée peut être subventionnée, à hauteur du prix de la mise en décharge.

Nous pourrions également être en mesure de proposer une subvention alternative au compostage de proximité donc, via un compostage industriel qui pourra être réalisé par une entreprise de recyclage et de récupération de déchets verts comme Bio Yvelines Services. Par ailleurs, la transition vers l'incinération peut être gérée par l'agence métropolitaine des déchets ménagers (Syctom).

Le projet de reconstruction de l'usine de traitement d'Ivry-Paris XIII montre aussi une certaine complexité des interactions entre acteurs publics, privés, et la société civile, qui pose la question des capacités de concertation de l'État. C'est pourquoi les discussions passées et les possibles futures évolutions du dialogue social entre les acteurs ne sont pas considérées dans notre périmètre d'étude.

Comme on peut le voir, la situation actuelle nécessite, entre autres, de nouveaux cadres d'analyse fondés sur une perspective holistique qui nécessite des paradigmes alternatifs basés sur une vision intégrative de l'ensemble du système. Cette démarche permettra d'éclaircir l'*asymétrie* de la négociation dynamique des frontières entre les propriétaires de processus économiques comme l'incinération et les propriétaires d'autres processus plus *vertueux* comme le compostage urbain qui a été implicitement décrit dans le livre *Is Capitalism sustainable?* (O'Connor, 1994).

Ce mécanisme d'*instrumentalisation* de l'économie considère l'*internalisation* de la nature et de la force de travail dans le système de la valeur, l'*externalisation* des déchets ultimes et l'*élargissement* des frontières de l'exploitation. Ce mécanisme revendique le concept de la *valeur d'usage* de Marx qui intègre la nature dans le système de production capitaliste et qui instrumentalise les processus qui ont été jusqu'à présent autonomes comme les processus *sauvages* qui sont représentés dans le chapitre XIII par la première ligne des sous-matrices, des intrants et des sorties du système 8.0.3. Il s'agit des processus qui ne sont pas inclus dans le système économique comme la reproduction d'une force de travail, comme un *fond* externe au système. Dans ce sens, le *paradigme* de l'économie circulaire fonctionne en même temps comme une partie du système d'*instrumentalisation* de l'environnement et comme une partie du système de protection de la nature.

Nous nous proposons maintenant de répondre à la question qui se pose du point de vue comptable, à savoir : Est-il plus couteux d'opérer une incinération ou une mise en décharge ? Pour répondre à cette question, il faut déjà noter que la création des processus d'incinération ou de compostage des déchets peut offrir un revenu aux propriétaires de ces processus. Nous pouvons constater que le compostage (g=50%) avec un r égal à -29% est moins *rentable* que l'incinération (g=50%) qui présente un r égal à -18%. Les deux processus présentent cependant un taux de profit négatif, ce qui signifie qu'ils doivent donc fonctionner avec une subvention ou un paiement égal à zéro pour les

propriétaires du processus. La *société de consommation*[142] instrumentalise donc la nature, utilise les intrants naturels, jette et recycle les déchets des processus pour générer un surplus au travers une subvention dans le cas du déchet urbain. Mais le système peut élargir le périmètre vers le travail humain en tant que ressource productive. Herbert Marcuse (1968), représentant de la deuxième génération de *l'École de Francfort* de sociologie critique, analyse l'*internalisation* et l'*instrumentalisation* du travail humain. De manière additionnelle, les êtres humaines participent par ailleurs également au système en tant que consommateurs (Galbraith, 1958).

Nous terminons en répondant à la question portant de l'égalisation des taux de profit (ou taux de rendements) de processus. Nous avons évoqué dans la section 13.2.5 qu'il n'y avait aucun mécanisme formel qui puisse assurer la même rentabilité pour tous les processus dans l'expression comptable du taux de profit; cela signifierait à une même productivité marginale du capital pour l'ensemble du système de la valeur (Passinetti, 1985). L'égalisation des taux profit est donc un résultat peu logique dans un système caractérisé par un taux de profit pour le salaire dans un secteur en reproduction externe qui peut être égal à zéro et où des processus internes du système sont en concurrence. Comme nous l'avons vu précédemment, la relation entre les prix et les taux de profit non uniformes est très complexe. Pour pouvoir étudier les résultats, nous avons réutilisé le concept des produits fondamentaux et non fondamentaux du chapitre V. Nous avons observé la même courbe d' hyperbole pour la mise en décharge et dans le compostage urbain, ce qui peut être causé par l'utilisation d'un seul *input* dans la première ligne de la matrice de dimension 2x2. Par contre, le processus d'incinération, qui utilise deux *inputs* dans la première ligne provoqué un autre comportement asymptotique, de l'hyperbole, qui peut s'expliquer par l'existence d'une réutilisation d'une ressource énergétique qui est formalisée comme un *input* dans la structure matricielle. Tous ces taux de rendement inégaux nécessitent désormais un réexamen critique de toute une série de cas d'école, en considérant une séparation entre matière et énergie dans une structure ayant les propriétés des matrices décomposables.

[142] *The Affluent Society* ou La Société de consommation a été écrit par John Kenneth Galbraith de 1958. Cet ouvrage a contribué à la diffusion du concept de *société d'abondance* aux États-Unis.

CONCLUSION DE LA PARTIE V

À l'issue de cette partie, nous pensons pouvoir affirmer que le conflit qui gravite autour de l'usine d'ordures ménagères de Ivry-Paris XIII est tout autant un conflit relevant des positionnements antagoniques des acteurs relatifs au modèle de développement urbain, qu'un conflict politique , institutionnel et environnemental ancré en Île-de-France.

Quel projet pour demain, lorsque la conjoncture territoriale et les outils d'évaluation évoluent ?

Considérons tout d'abord les résultats de la mise en décharge qui représentent un flux linéaire où *CL* et *MCI* sont égaux à zéro et ou les sous-produits économiques *gênants* peuvent être ignorés et expédiés vers la biosphère sans aucune conséquence pour l'économie. Ceci s'est produit jusqu'aux années 60 où tous les déchets étaient mise en décharge du fait de la valeur négative des taux de profit qui ne permettait pas de payer le coût de service de décharge. Cette situation présente en matière comptable une disparition de la valeur à travers un manque de retours sur les *inputs*. Étant donné que la mise en décharge est non soutenable au niveau économique, il faut accepter une compensation économique pour chaque tonne du déchet déchargée.

On se rend par ailleurs compte que la variation représente un processus d'incinération qui ne permet pas de donner des *inputs* matériels à d'autres processus en amont du système. L'indicateur du *MCI* indique que cette variation est moins circulaire que le compostage du déchet urbain. Cependant le résultat de ce ratio de bouclage est relativement proche a celui trouvé par Saveyn *et al* (2016).

Nous avons évoqué dans les paragraphes précédents la possibilité de bouclage de flux en utilisant l'usine d'Ivry-Paris XIII. D'une part, l'unité de valorisation (UVE) de l'usine va réduire de moitié la capacité d'incinération et va produire une baisse significative des rejets atmosphériques. Cette unité d'incinération va obtenir un bouclage de l'énergie pour chauffer 104000 logements de 80m^2. D'autre part, l'unité de valorisation organique (UVO) permettra le bouclage de matière à travers le traitement de biodéchets. Depuis 2016, Ivry a mis en place la récupération des bio déchets dans les cantines scolaires (Ivry94, 2016).

Nous nous sommes rendu compte au travers de la participation dans les assemblées générales de l'association 3R et des colloques proposés par l'association *Zero waste* France et par Syctom, de la difficulté du dialogue social. Nous avons remarqué que la résolution du conflit ne se trouve à l'intérieur du domaine de l'ingénierie du déchets, mais dans une amélioration du dialogue entre les acteurs, comme exemple de ce rapport de force:

- Au milieu des années 2000, Syctom a investi sur une unité de tri mécanobiologique (TMB) et plusieurs méthaniseurs. Ces deux solutions suscitent des oppositions au sein de la municipalité et des associations locales. En 2014, le conseil municipal a adopté un vœu contre l'implantation de TMB sur le territoire.
- En 2016, seule la phase d'étude du projet de reconstruction de l'usine est validée. La troisième phase de concertation post débat public considère quatre ateliers thématiques, réunions du comité de suivi, présentation du plan B'OM).

- À partir de 2017 le Syctom prévoit le dépôt de démarches de permis de construction et l'autorisation d'exploitation.

Considérons, pour terminer la question de la gouvernance des frontières et les droits d'explorations. Le dimensionnement de l'usine est au cœur du débat. Certains partisans comme Syctom le justifient comme *réaliste* compte tenu du volume future des ordures ménagères. D'autres comme le collectif 3R et *Zero waste* estiment qu'il faudrait davantage agir sur la réduction des déchets à la source et prévoir un site moins grand, ils remettent donc en cause l'élargissement de la frontière d'appropriation et d'exploitation en considérant que les incinérateurs d'Issy-les-Moulineaux et de Saint-Ouen propriétés de Syctom sont suffisants.

On peut remarquer que pour diminuer l'*asymétrie* entre développement urbain et *l'instrumentalisation* de la nature (Moore, 2015) que considèrent l'*internalisation* de la nature et de bien-être des riverains d' Ivry dans le système de valeur, l'*externalisation* des déchets du métabolisme urbaine et l'*élargissement* des frontières de l'exploitation à travers de la variation de la dimension de l'usine de traitement. Ce projet nécessite un investissement de 1,8 milliard d'euros, somme qui pourrait être investie de façon plus vertueuse pour la prévention du déchet à la source.

CONCLUSION DE LA THESE

Conclusion générale : termes théoriques versus termes empiriques

L'économie circulaire repose sur le principe général, selon lequel les déchets des uns peuvent devenir la matière première des autres. Dans ce sens, l'approche de René Passet exprime le concept de serre d'activité économique dans la grande boucle de la biosphère (Payot, 1979 ; Passet, 1996). De façon à répondre à cette question, il apparaît même urgent de changer de modèle économique, de trouver un mécanisme qui permettra de contrôle la croissance des flux de matières et d'énergie. L'économie circulaire, en répondant à cet appel, essaie de changer la logique linéaire de production dominante pour une approche de bouclage des échanges de flux de la matière et de l'énergie. Sur cette base, la capacité de l'économie circulaire à proposer un véritable changement de paradigme peut être interrogée (Braungart *et al*, 2009).

Ce changement de paradigme théorique nécessite des solutions simples et convaincantes du point de vue pratique, par exemple un système fiscal revu pour favoriser le long terme signifiant simplement de ne pas taxer ce que l'on cherche à favoriser, comme les ressources renouvelable, ce qui inclut le travail humain et donc les salaires. Le fait de ne pas taxer les activités vertueuses et de leur donner une subvention permet de créer un cercle vertueux qui favorise la création d'emplois dans les secteurs reposant massivement sur la main-d'œuvre. Cela permet d'accroître la compétitivité des activités de production qui montrent parfois un taux de profit négatif.

Par ailleurs, nous avons constaté que le paradigme de l'économie circulaire fonctionne en même temps, comme une partie du système *d'instrumentalisation* de l'environnement et comme une partie du système de protection de la nature.

Conclusion spécifique à chaque dimension

Quelle circularité dans les grands cycles de la biosphère des relations nature-nature ?

Nous nous sommes efforcés dans la partie I de donner une description des cycles de la biosphère qui nous permette de comprendre la gouvernance des frontières entre l'économie et la biosphère, ses enjeux et ses conditions de possibilité et d'émergence des systèmes de valeur écologiques. La description que nous avons proposée a pour objectif d'éclaircir la structure et les échanges entre les composantes du système qui a contribué à rendre possible une analyse des opportunités d'amélioration et de changement de flux physiques dans un cycle, et qui détermine sa nature, ses caractéristiques, ses limites et ses dimensions. Sur le plan théorique, les parcours des molécules des cycles, même hétérogènes, a du mal à se départir d'une structuration très complexe qui généralement ne porte qu'un intérêt limité aux questions biophysiques, très éloigné d'un cadre qu'il intègre d'autres domaines plus socio-économiques. Pour répondre à la question du bouclage dans les grands cycles de la biosphère des relations nature-nature , si l'on raisonne à partir des relations nature-nature, on peut constater que certains parcours des molécules peuvent être circulaires et linéaires en dépendant de la temporalité de cycle, des relations de gouvernance entre les frontières des cycles et des caractéristiques entropiques du cycle.

Dans ce sens, nous pouvons comparer les cycles de C, N, P, S et de l'eau afin de mettre en perspective leurs différences, comme par exemple la molécule de P qui parcourt fondamentalement la lithosphère et l'hydrosphère tandis que, les molécules de C et N parcourent la lithosphère, l'hydrosphère et

l'atmosphère. Le cycle de phosphore est composé de flux qui ne sont pas complètement circulaires en revanche. Ces flux en cascade ont extrait des ressources de la terre, qui ne retourneront pas à la terre dans leur totalité.

Tableau : Comparaison entre cycles de C, N, P et eau.

	Atmosphère	**Lithosphère**	**Hydrosphère**	**Biosphère**
C	L'émission dans l'atmosphère par la respiration et la décomposition des matières organiques. Les activités humaines telles que la combustion de combustibles fossiles contribuent à libérer du dioxyde de carbone dans l'atmosphère.	Le stockage comme carbonate.	La dissolution de dioxyde de carbone dans l'océan et l'acidification de l'océan.	L'absorption du dioxyde de carbone par les plantes via la photosynthèse et son ingestion par les animaux.
N	L'émission dans l'atmosphère de NO^-, NO_2, N_2O qui produisent la pluie acide. Les émissions de gaz d'acidification : protoxyde d'azote (N_2O). La décomposition des déchets biologiques permet à l'azote de retourner dans l'atmosphère.	Le stockage comme nitrate ou KNO_3.	Le NO_3^- , NO_2^- et NH_4^+ qui peut être fixe à partir de N_2 à travers des diatomées dans la mer.	L'absorption de l'azote dans l'atmosphère par des microbes appelé fixation, ou via des procédés industriels.
P		Le phosphore est présent dans la roche dans la forme d'apatite $Ca_{10}(PO_4)_6X_2$. Les processus naturels d'érosion en permettent l'introduction dans les systèmes biologiques.	L'Homme utilise le phosphore dans l'agriculture en tant qu'engrais et dans les détergents. Son usage excessif peut entraîner des problèmes d'eutrophisation.	L'absorption du phosphore par les organismes. Après la décomposition du déchet biologique, il peut s'accumuler dans les sols et les sédiments.
Eau	Le processus par lequel l'eau voyage successivement de l'air (condensation) à la terre (précipitation) avant de retourner dans l'atmosphère (évaporation).	Le stockage comme glace ou permafrost.	L'Homme, peut transformer ce cycle, à travers l'irrigation, la construction de barrages ou l'émission des déchets comme ruissellement, écoulement souterrain et l'infiltration.	L'utilisation d'eau par les plantes via la photosynthèse. L'évapotranspiration.

Source : L'auteur.

Quels indicateurs utiliser pour mesurer la circularité des relations nature-homme?

Comme nous l'avons déjà mentionné précédemment dans la partie IV, l'évaluation de la circularité des relations nature-homme se caractérise par l'ampleur des indicateurs (Schandl *et al.* 2015 ; Brocken *et al,* 2017) qu'elle suscite par sa portée théorique et pratique dans le contexte spécifique de chaque structure, mais le système des indicateurs que nous intéressé pour plusieurs raisons : la diversité des acteurs, la gouvernance des acteurs, le système de la valeur associée à la gouvernance et le flux de biens et services dans ce système complexe.

Nous sommes conscients que les bases de données ne sont pas spécialement adaptées aux questions posées par les modèles de type EIO, modèles de production jointe appliqués à l'économie circulaire et à l'utilisation des indicateurs biogéochimiques. C'est pourquoi nous proposons d'utiliser une quantité limite des indicateurs adaptée aux basses données disponibles.

Nous affirmons que les approches de la Fondation Ellen MacArthur (2010, 2013) et de Liu Yifang (2007) mesurent directement un bouclage de flux de la matière explicitement parce qu'ils considèrent des processus de réversions dans le flux en cascade. D'une part, l'indicateur de la Fondation MacArthur utilise une mesure de flux en cascade comme d'autres indicateurs de l'ADEME, mais il propose en plus un indicateur de bouclage *MCI* qui permet de mesurer le bouclage en pourcentage. D'autre part, l'indicateur proposé par Yifang utilise une mesure de flux en cascade comme autres indicateurs tels que le Footprint, le HANPP et l'EROI, mais aussi un indicateur de bouclage *CL* qui permet de mesurer le bouclage.

Cepandant cette proposition congrue du problème ne suffit absolument pas pour mesurer la circularité dans la complexité. Comme nous l'avons vu dans le chapitre VI, la manière dont les relations nature-homme sont présentes n'offre pas, de cadre de réflexion durable sur la gouvernance des relations nature-homme : 1) dans la mesure où un grand nombre des résultats physiques sont présentes sans un contexte institutionnel 2) du fait du critère financier au regard duquel les propriétaires des ressources ont tranché en faveur d'alternatives plus profitables.

Quel système de valeur dans les bouclages de flux entre la nature et l'économie?

Dans notre étude, l'usage des modèles *input-output* de Leontief nous a permis de donner un cadre formel à l'analyse intersectorielle ou interprocessus des flux de la matière et d'énergie dans la biosphère. D'autre part la démarche économique de Sraffa, nous a permis de reconstituer l'histoire de la théorie de la valeur à travers de la production jointe, en tenant compte à cet égard du fait que Sraffa ne cherche pas à représenter directement les cycles biophysiques. Par contre, celui-ci a représenté les relations entre les ressources à l'intérieur d'un système de régulation. Ce modèle peut être représenté à travers d'un système de valeur en échange (O'Connor, 1993) qui a été appelé par Sraffa *système de marchandises.*

Il est difficile de porter un jugement précis sur le flux joint des commodités ou des ressources naturelles dans les compartiments de la biosphère tant que celle-ci n'est pas considérée en rapport avec la valeur de commodités ou des biens naturels. On peut choisir de représenter quand même les ressources écologiques, mais alors cela signifie qu'un prix leur est attribué. Que signifie ce prix ou relation de valeur? Si les ressources écologiques ne sont pas produites dans une usine avec une structure de coûts, et servent donc d'apport extérieur pour le système économique, le prix ne correspond pas aux valeurs d'un

bien. Par contre, il représente les relations de consommation et de production entre les acteurs du système dans une transaction, donc le bien est le support physique de la transaction, c'est-à-dire que la rente est un prélèvement du surplus en faveur du propriétaire de la ressource écologique.

Ce système de prix n'est pas une expression universelle mais une expression de la spécificité d'une sous ensemble de processus économiques (Verger, 2016). Dans la pensée de Vernadsky et des physiocrates, les ressources de la biosphère ont été systématiquement externalisées du système économique. Pourtant, il est illogique de généraliser l'approche du système pour intégrer ou internaliser les compartiments de la biosphère dans une pensée universelle. Dans une vision *neo-marxiste*, ce système de valeur représente de façon intégrée les relations *fondamentalement asymétriques* d'échange entre la biosphère et l'économie. Le processus d'appropriation de capital naturel utilise quatre *inputs* fondamentaux ou *fours cheaps* dans le langage de Moore (2015) : la main-d'œuvre, l'alimentation, l'énergie et les matières premières. Moore , à l'origine de l'appellation *fours cheaps* propose l'utilisation synchronisée des quatre composants afin de générer et entretenir une dynamique productive vertueuse, qui génère des profits croissants. La tendance du siècle dernier a été de dissoudre les frontières entre chacun des *fours cheaps*, pour rester dans une phase d'accumulation. Nous constatons actuellement la dissolution des frontières entre les *fours cheaps* qui s'est illustré lors l'année 2000 une nouvelle phase ou les marchés de matières premières du monde étaient financiarisés et numérisés en augmentant leur volatilité des prix (Moore, 2015).

Quel projet de transformation du centre Ivry-Paris XIII pour demain, alors que la gouvernance sur les frontières entre l'économie et l'environnement évolue ?

Nous avons discuté de l'existence des frontières de gouvernance entre la nature et l'homme, convention humaine se traduisant dans un système de valeur qui gère cette gouvernance, selon une configuration du capitalisme dans laquelle l'élargissement des frontières et l'*instrumentalisation* de la nature sont une forme institutionnellement dominante.

Pourtant ces *instrumentalisations* de la nature ne peuvent pas non plus être comprises si l'on ne tient pas compte des dynamiques locales de la gestion des ressources et des enjeux sociaux. C'est cette articulation entre la dynamique technique économique et la dynamique sociale qui éclaire le mieux selon nous la rupture du lien métabolique élémentaire ou *metabolic rift* entre l'économie et la nature (Foster *et al.* 2010; Moore, 2011). Nous partageons ainsi le constat du collectif 3R selon lequel il ne s'agit pas seulement d'un conflit auteur d'une analyse technique économique : c'est même le bien-être des riverains disputés au sein de la société qui se répercute à l'intérieur de la communauté locale. On pourrait ajouter que le compromis du débat sur la construction de l'Incinérateur Ivry-paris13 se reflète dans la discussion des acteurs et le compromis que représente le projet dans sa version actuelle, lequel a incorporé les critiques qui lui ont été adressées sur la méthanisation, et représente un effort de triangulation d'intérêts et de contraintes technico économiques bien souvent contradictoires.

Dans le but de formaliser cette discussion, nous avons présenté les variations des systèmes de la valeur qui tracent les avenirs possibles de l'économie circulaire à l'échelle locale. Nous avançons dans trois formes d'avenir pour les flux des déchets franciliens (mise en décharge, incinération et compostage des déchets). Quand cela est pertinent, nous lions ces conclusions à l'évaluation réalisée à la dimension institutionnelle du sujet.

- **Un futur possible : un cheminement vers un système ouvert**

Les résultats montrent que le cas qui considère une mise en décharge produit pas de récupération, de valorisation ou de recyclage des déchets. En conséquence, les valeurs de CL=0 et MCl=0 représentent une boucle ouverte. On a remarqué dans notre modèle un taux de profit négatif dans le cas qui considère une mise en décharge. Cette valeur ne permet pas de payer le coût du service de décharge. Ensuite cette situation présente en matière comptable une disparition de la valeur à travers un manque des retours sur les inputs. Étant donné que la mis en décharge est non soutenable au niveau économique, il y a une compensation économique pour chaque tonne de déchets déchargée. Donc, ce système *instrumentalise* la nature, utilise les intrants naturels, un service de régénération de la force de travail externe au système, pour jeter les déchets des processus afin de générer un surplus au moyen d'une subvention dans le cas de déchet urbain.

- **Un futur désiré : l'essor du bouclage de flux de matière**

Dans le compostage, l'indicateur *MCI* a donné un ratio de 67% qui utilise directement une partie des déchets comme input de la production de compost. On peut remarquer que cet indicateur capterait implicitement le bouclage de certains flux du métabolisme urbain comme l'utilisation de déchet végétaux dans la préparation du sol avec l'incorporation de l'azote du compost. Nous avons constaté dans notre modèle que le prix de vente du compost pose un problème de l'équilibre financier dans le système de la valeur du compostage et que des subventions seront donc éventuellement nécessaires à sa bonne marche. Le passage de la mise en décharge au compostage peut être une réussite en utilisant une entreprise de recyclage et de remplissage de déchets verts comme Bio Yvelines Services.

Supposons comme dans le chapitre VIII que l'agriculture urbaine utilise directement une partie de la ressource (déchet végétal urbain) comme input de la production de végétaux. L'entreprise Bio Yvelines Services doit traiter 0,3 Kg d'azote/pers/an dont 3,7 tonnes d'azote par an. Il s'agit de 36,63 tonnes de déchets à traiter chaque année. Selon le rapport des entreprises d'insertion en Ile-de-France de 2015, Bio Yvelines Services traité 24000 tonnes/an de déchets verts en 2014, dont l'azote peut représenter 0,15% des déchets recyclés par an.

Une autre solution serait d'utiliser un système de compostage urbain de proximité (bénévole) avec un taux de profit Sraffian égal à zéro, comme est le cas dans le 11e arrondissement de Paris qui a lancé une expérimentation de compostage des biodéchets sur une cinquantaine d'immeubles volontaires.

- **Un futur probable : la coexistence du bouclage de flux de matière et d'énergie**

Nous pouvons constater dans notre modèle que le compostage et l'incinération présentent un taux de profit négatif. Ils doivent donc fonctionner avec une subvention. Ensuite comme dans la mise en décharge la société de consommation *instrumentalise* la nature et la force de travail, valorise et recycle les déchets des processus pour générer un surplus grâce à une subvention dans le cas de déchet urbain et ensuite le système peut élargir le périmètre vers d'autres territoires, où les ressources et les déchets, qui sont gérés par l'agence métropolitaine des déchets ménagers dans le cas de (Syctom), sont abondants.

Entre les objectifs de Syctom à l'avenir :

- La construction de la nouvelle unité de valorisation énergétique (UVE) pourrait commencer en 2018. L'actuelle usine serait démolie pour céder la place à la nouvelle unité de valorisation organique (UVO) dont l'activité démarrerait en 2027. Cette unité permettrait la séparation de la matière organique contenue dans les déchets ménagers.

- Renforcer l'accueil des biodéchets, dont, l'élargissement des frontières de traitement suivant la logique de Jason Moore en 2015, à travers de 2 positions possible. 1) Maintien des 8000 tonnes de traitement sur site visant la production de compost + l'accueil, préparation et transfert de 12000 tonnes supplémentaires (total : 20000 tonnes de biodéchets réceptionnées). 2) Accueil, préparation puis transfert de 30000 tonnes de biodéchets sans traitement sur le site.

- Filières de traitement des OMR (Ordures ménagères résiduelles) : mettre fin au TMB (tri mécano-biologique) et la remplacer, un tri préparation maximisant la production d'un combustible solide de récupération (CSR).

- Trouver des alternatives à la méthanisation sur site.

- L'optimisation de la production de vapeur pour le chauffage urbain.

Entre les enjeux des associations locales dans l'avenir :

- Une chance historique d'annoncer la décroissance de l'incinération ;

- Remettre le projet à plat et la politique du déchet dans le bon sens pour un projet en accord avec la réglementation et l'économie circulaire ;

- Avec la volonté politique des élus et le financement nécessaire à une politique zéro déchet.

PARTIE VI : SYNTHESE

VERSION FRACAISE

CETTE THESE SE PROPOSE de tenter d'évaluer les opportunités de l'économie circulaire à l'échelle territoriale et d'y engager le rôle que jouent les cycles biogéochimiques, les systèmes économiques et les frontières de régulation institutionnelle entre l'économie et l'environnement au cours du projet de transformation du centre de traitement de déchets ménagers à Ivry-Paris XVIII.

Pour y parvenir, on peut adopter trois dimensions différentes. L'une, inspirée par la définition de biosphère proposée par Vernadsky, analyse le parcours des molécules comme l'azote dans la biosphère. Les deuxième, plus proche de la perspective privilégiée par Sraffa et Leontief, conduit à reconstituer une historie de la pensée économique sur la base de l'interface entre l'économie et l'environnement. La troisième, inspirée de la méthode dialectique de Moore, consiste à confronter les positionnements des acteurs autour de la régulation des frontières entre les processus d'appropriation de l'économie et la préservation de l'environnement.

La première partie de la thèse consiste à confronter la production de la revue scientifique à ce que nous connaissons aujourd'hui des trois dimensions.

Sur la première dimension de notre thèse, la description physique des cycles biogéochimiques que nous avons proposés a pour objectif d'éclaircir la structure et les échanges entre les composantes du système qui a contribué à rendre possible une analyse des opportunités d'amélioration et de changement des flux physiques dans un cycle, et qui détermine sa nature, ses caractéristiques, ses limites et ses dimensions. Il est particulièrement difficile de donner une vision globale, fixe et homogène de la configuration actuelle de chaque cycle dans la mesure où, comme cela a été relevé par de nombreux chercheurs, depuis le début de la préoccupation pour le changement climatique. Notre analyse tend cependant à faire ressortir la place centrale de l'insertion dans le contexte planétaire, tant que la préoccupation pour l'altération des cycles naturels et, tant que la biosphère nous semblent encore dépendantes des paramètres physico-chimiques de chacun des compartiments de la terre comme l'atmosphère, la lithosphère et l'hydroptère.

Répondrons alors à la question suivante : ***quelle circularité dans les grands cycles de la biosphère des relations nature-nature ?***

Tout comme l'analyse des débats sur l'anthropocène, l'évolution des cycles connaît actuellement une phase de développement dans laquelle la convention n'est plus industrielle, comme c'était le cas pendant la révolution industrielle. Le développement d'activités plus durables est considéré comme une occasion à saisir dans une vision de l'économie verte porteur à cet égard. Par exemple, le système extractif des matières premières basses de l'économie de l'azote et du phosphore devient fortement entropique. Se pose alors la question de savoir si l'économie rurale et urbaine a fait un usage optimal des ressources.

Une hypothèse prospective est que l'usage des matières premières dans l'économie linéaire (voie linéaire), est fondée sur une consommation des matières premières et une production des déchets jetées vers la biosphère. Mais à la différence de la voie complètement linéaire, les cycles de la biosphère ne semblent pas complètement assumer d'être sur cette voie linéaire.

Sur le plan théorique, le parcours des molécules des cycles, même hétérogènes, a du mal à se départir d'une structuration très complexe qui généralement ne porte qu'un intérêt limité aux questions biophysiques, qui est très éloigné d'un cadre qui intègre d'autres domaines plus socio-économiques qui permettent d'élargir le domaine d'analyse des relations nature- nature vers des relations nature-homme.

Si l'on raisonne à partir des relations nature-nature, on peut constater que certain parcours de molécules peuvent être circulaires et/ou linéales en fonction de la temporalité de cycle. Dans cette perspective,

l'agriculture sur le cycle annuel fait un usage extrêmement intensif de produits chimiques qui polluent sols et cours d'eau basés sur des cycles très longs comme la synthèse naturelle d'azote et de phosphore. Cette notion du temps de cycle nous a aidé à cadrer les discussions sur la mesure des cycles de la partie III de la thèse, mais sur tout fourni un cadre pour la compréhension de la structure de la relation autour du sujet des opportunités d'économie circulaire à Paris, qui ont été analysé dans la partie V de la thèse.

Nous nous proposons maintenant d'étudier ***une définition contextuelle de l'économie circulaire : un cadre d'analyse durable ?***

La question de la nécessité d'une approche holistique pour étudier les cycles de la nature, est aussi ancienne que l'économie. Ce qui est en jeu derrière le capitalisme, c'est sa capacité de porter la vie, on se reporte à l'ouvrage L'économique et le vivant de René Passet (Payot, 1979 ; Passet 1996). L'approche de René Passet exprime le concept de serre de l'activité économique dans les grandes boucles de la biosphère (Passet, 1996) de façon de répondre à sa question. Il convient donc de se placer dans une perspective holistique des concepts utilisés pour l'économie écologique et l'écologie industrielle.

Dans le cas d'un recyclage en économie écologique, par l'intégration des processus de la biosphère pour former des boucles vertueuses, l'économie circulaire entraine une réduction de la consommation des ressources naturelles épuisables par déplacement vers les systèmes environnementaux, une réduction de la consommation des énergies fossiles épuisables et une réduction des émissions nettes des déchets matériels.

Dans le cas d'un recyclage en écologie industrielle, par le biais de processus économiques réunis en boucle, l'économie circulaire entraine une réduction de la consommation des ressources. Cependant, ce n'est pas suffisant pour corriger la situation du bouclage de flux, il sera tout aussi important de renforcer les politiques destinées à la promotion d'une économie désindustrialisée, plus sobre en carbone, en énergie et en ressources naturelles non renouvelables comme l'azote et le phosphore.

Dans ce contexte, l'économie circulaire est d'un côté, une application concrète et politique de l'écologie industrielle, il s'agit du recyclage, re-usage, efficacité énergétique, technologies propres. D'un autre côté, il semble opportun d'intégrer la vision de la thermodynamique des systèmes ouverts qui laisse entrevoir la perspective d'un développement qui n'accélère pas l'entropie sur notre planète.

Retour à la case de départ : L'approche holistique permet d'intégrer les visions écologiques et industrielles dans un cadre transversale aux enjeux écologiques, économiques, biophysiques et institutionnel. Aux lenteurs inhérentes au changement institutionnel s'ajoutent la difficulté d'équilibrer les rapports entre les acteurs économiques de la politique de développement d'économie circulaire et de ses protagonistes. On peut constater une permanente relation de domination entre les élites, les secteurs scientifiques et les secteurs économiques puissants d'un côté, et les petits usagers et la société civile organisée de l'autre.

Dans la deuxième dimension de notre thèse, nombre de chercheurs ont exprimé leur accord sur l'idée que l'analyse input-output dépasse en fait largement les activités de l'auteur Leontief: raconter la formation de l'analyse input-output entre 1920 et 1950, c'est aussi raconter les transformations de la science économique.

C'est dans cet esprit que certains auteurs ont utilisé des secteurs de l'environnement dans le modèle, Cumberland en 1966 intègre les secteurs de l'environnement au modèle I/O en utilisant un modèle industry by industry. Il ajoute les bénéfices environnementaux en valeur, coûts environnementaux en valeur, coûts de restauration de l'environnement en valeur.

Après quelques années Walter Isard en 1968 et plus tard Peter Victor en 1972 présentent les flux de matière et d'énergie entre le système économique et le système écologique dans un tableau commodities by industry . Isard est connu principalement comme le fondateur de la science régionale qui s'intéresse entre autres aux analyses écologiques et environnementales, à la gestion des ressources en utilisant les analyses entrée-sortie.

En 1969, le modèle d'Ayres-Kneese intègre au modèle de Daly dans un tableau industry by industry la première loi et la deuxième loi de la thermodynamique donc, l'élimination des polluants, le recyclage et la conservation de la matière.

Aujourd'hui, le modèle été élargi, comme pour exemple la mesure de flux du déchet dans le Waste Input-Output Analysis ou WIO (Nakamura *et al.* 2002), l'application à l'analyse de cycle de vie (Takase *et al.* 2005).

Dans notre étude, l'usage des modèles input-output permet de donner un cadre formel dans l'analyse et les réflexions sur le flux de matière et d'énergie de la biosphère. Dans ce sens, le chapitre 6 présente une typologie de quatre structures input-output du système pour formaliser les relations économiques physiques.

Le chapitre VII conduit à l'élaboration et au chiffrage d'une matrice des commodités et processus en utilisant le modèle d'Isard 1968 et Victor 1972. Il s'agit des quantités des différents biens produits, polluants émis, déchets recyclés et valorisés par les branches à l' occasion d'une consommation intermédiaire. Le chapitre 10 est consacré à l'analyse de ces matrices et des indicateurs par une méthode technico-économique. Il est aussi l'occasion de tester la capacité prévisionnelle de la méthode I/O pour donner un cadre plus dynamique applicable à l'économie circulaire.

L'autre auteur phare de notre démarche économique dont Sraffa, nous a permis de reconstituer une histoire de la théorie de la valeur à travers la production jointe. Le chapitre V a présenté le message principal du travail de Sraffa et comment celui-ci se comprend par rapport à certains travaux importants en théorie de valeur (Ricardo, les marginalistes, Von Neumann).

Revenons au prix et à la structure de valeur***, quel système de valeur dans les bouclages de flux entre la nature et l'économie?***

Une théorie de la valeur signifie qu'une valeur est attribuée à chaque marchandise (bien ou service) produite par le système, de telle sorte que l'on puisse échanger chaque marchandise contre une quantité calculable de chaque autre marchandise. On pose généralement que chaque unité de marchandise possède la même valeur. Dans la théorie de Sraffa, la valeur signifie le rapport d'échange qui, si les échanges étaient effectivement réalisés, permettrait de reproduire le système et de distribuer tout le surplus (s'il y en a un) aux différents agents (salariés, capitalistes, rentiers, l'État aussi si l'on introduit des taxes).

Dans notre thèse, l'usage de l'approche de production jointe permet de donner un cadre de réflexions sur les relations de valeur entre le système économique et la biosphère. Il est difficile de donner un jugement précis sur flux joint des commodités ou des ressources naturelles dans les compartiments de la biosphère tant que celle-ci n'est pas considérée en rapport avec la valeur de commodités ou des biens naturels. Dans ce sens, le chapitre VIII a présenté une typologie qui essayé de structurer dans 10 différents parcours les flux de matière et d'énergie dans un univers entropique.

Les chapitres XII et XIII ont débouché sur l'élaboration d'un ensemble de processus et de transferts de production physique interdépendants. Il établit également huit hypothèses qui ont été explorées dans le chapitre V de la thèse. Nous utilisons ces hypothèses pour calculer les prix relatifs de ressources écologiques des biens, déchets, travail, énergie d'un système de production.

Par ailleurs, il est illusoire de croire que si on intègre les ressources écologiques, les prix seront plus justes, ou plus soutenables. On peut tout même choisir de représenter les ressources écologiques, mais alors cela signifie qu'un prix leur est attribué. Que signifie ce prix ou cette relation de valeur ? Si les ressources écologiques ne sont pas produites dans une usine avec une structure de coûts, et servent donc d'apport extérieur pour le système économique, le prix correspond à une rente, c'est-à-dire à un prélèvement du surplus en faveur du propriétaire de la ressource écologique. Si les ressources écologiques sont produites, le prix incorporera les échanges nécessaires à la reproduction du système et s'il y a un taux de profit positif, il incorporera aussi la valeur d'une part du surplus. Dans ce sens, le chapitre XII est consacré à l'analyse de ces relations par une méthode d'itérations de prix. Il est aussi l'occasion de tester la capacité de la démarche de production jointe de donner un cadre pour analyser le partage des ressources entre les processus économiques et la biosphère, en considérant les diverses échelles temporelles des processus économiques et naturels.

Sur la troisième dimension de notre thèse, le chapitre VI représente une façon d'intégrer les relations entre le système de la valeur en échange de l'interface biosphère et économie dans une vision marxiste et un système en régulation. Ce système de régulation est une expression de fonctionnement d'un sous-ensemble des sociétés humaines. Ce système est l'expression des relations fondamentalement asymétriques entretenus par le système capitalisme entre la biosphère et l'économie. Il faut distinguer deux formes d'appropriation. La première correspond à la manière dont on utilise et on entretient les processus biophysiques de reproduction des ressources comme la force de travail, la forêt et l'agriculture. Le second usage correspond à l'extraction géologique de la matière et de l'énergie.

Le processus d'appropriation du capital naturel utilise quatre inputs fondamentaux ou fours cheaps dans le langage de Moore (2015) comme la main-d'œuvre, l'alimentation, l'énergie et les matières premières. L'utilisation synchronisée des quatre composantes parvient à générer et à entretenir une dynamique productive vertueuse, qui génère des taux de profits croissants.

Ce type de processus d'expansion et d'appropriation de la biosphère s'est exprimé de la façon la plus dramatique dans la conquête des Amériques pour les puissances européennes à travers un mécanisme d'instrumentalisation de la nature (Moore 2010a, 2010b). Ce mécanisme a déjà été décrit au chapitre VI de la thèse, considérant deux étapes : l'internalisation de la nature dans le système de valeur, l'externalisation des déchets et l'élargissement des frontières de l'exploitation.

Dans ce sens, le problème du capitalisme est aujourd'hui que les opportunités d'appropriation des biens de production qui se trouvent proches des leurs frontières dans la zone d'exploitation se réduisent drastiquement. En conséquence, le système de régulation n'est pas capable de contrôler les frontières de l'investissement et l'appropriation du capital écologique.

La quatrième partie de la thèse consiste à proposer un cadre conceptuelle d'analyse. Ce cadre a été résumé dans un logigramme (début de partie IV), qui montre les étapes, successives ou simultanées, permettant d'élaborer sa stratégie d'économie circulaire en utilisant les trois dimensions d'analyse dont économique, biophysique et institutionnel.

La première partie de la dimension économique a proposé une typologie des modèles intersectoriels de type input-output. L'usage des modèles input-output permet de donner un cadre formel dans l'analyse et dans les réflexions sur le flux de matière et d'énergie de la biosphère. En ce sens, le chapitre VI présente une typologie de quatre structures input-output du système pour formaliser les relations économiques physiques en utilisant l'approche proposée pour Walter Isard en 1968 et plus tard par Peter Victor en 1972.

La deuxième partie de la dimension économique a proposé une typologie des modèles de production jointe. Ce chapitre cherche à aborder la réflexion aux interdépendances physiques qui existent entre

systèmes économique et écologique, liées à différentes structures de valeur. L'analyse en termes de valeur permet de comprendre comment est distribué le surplus entre les acteurs économiques : l'incorporation des ressources écologiques, ou des pollutions, signifiera simplement que le surplus sera échangé directement, entre un plus grand nombre d'acteurs. Cela peut être intéressant pour pouvoir protéger les ressources naturelles (si elles ont un prix, on peut se servir de la rente pour financier leur protection). Mais on peut aussi choisir d'investir pour protéger la nature sans lui attribuer un prix

Pour formaliser cette relation, cette partie propose un classement des structures qui représentent les parcours cycliques et en cascades des biens dans la biosphère. Dans ce sens, la structure distingue trois types de systèmes thermodynamiques : le système isolé, le système fermé et le système ouvert, lequel échange la matière et l'énergie avec l'environnement hors du système. Le classement est enrichi par les travaux menés pour O'Connor et Schoer en 2009 sur les processus présent dans les petit, moyen et grands cycles et également dans les relations entre la matière, l'énergie et la thermodynamique proposes pour Prigogine (Prigogine, 1967; Morowitz, 1968; Ulanowicz, 1983).

Dans ce contexte, cette thèse propose une typologie de dix structures du système pour formaliser les relations économie-physique. La structure numéro 10 concerne la matière et l'énergie. Au-delà de cette typologie, la formalisation du cadre conceptuel sur le cycle de l'azote a été réalisée sur une structure des cycles et des cascades en utilisant le logiciel ePLANETe avec la galerie des indicateurs ou KIKs (cf. annexe VIII.C du chapitre VIII sur la structure des cycles et des cascades en ePLANETe).

Classiquement Sraffa a supposé que le surplus est divisé entre les capitalistes, les travailleurs et les rentiers ici les possesseurs de l'énergie. Alors comment répartir le surplus des processus de l'atmosphère, de la lithosphère ? Comment la démarche peut-elle être améliorée pour mieux mesurer les cycles biogéochimiques ?

Nous soutenons dans cette partie la nécessité de répondre à cette question. Les méthodes réflexives (Patterson, 2014) permettent de calculer le prix et l'efficience des matrices non carrées. La méthode de production jointe (Sraffa, 1960) permet quant à elle de calculer le prix et la taux de surplus des matrices carrées. Nous pouvons avoir le prix relatif ou relation d'échanges entre les biens. Ainsi, les réponses mènent à la conclusion qu'un système de la valeur est difficilement capable de mesurer différents numéraires prenant en compte leurs caractéristiques thermodynamiques et entropiques.

La dimension biophysique analyse les démarches d'évaluations des cycles biogéochimiques. Dans cette perspective, l'économie circulaire s'appuie sur sept piliers qui correspondent aux dimensions dont la prise en compte est indispensable dans tout processus d'évaluation de la circularité. Ces piliers sont de nature économique et sociale. Ils ne sont pas indépendants les uns des autres, mais plutôt marqués par de fortes interactions qui sont à la base de la problématique de bouclage de flux : concilier des objectifs interdépendants et de nature diverse pour analyser les pressions exercées pour les activités du système socio-économique sur le capital naturel, les déchets ou empreinte écologique. Elle peut être définie comme le passif, l'actif écologique est composé pour des activités comme l'agriculture, pêcheries, forêts gérées, etc. (Loiret, 2013b).

Cette vision à sept piliers est aussi valable dans la biosphère dont la durabilité se pose en termes de co-viabilité. D'après Passet (Payot, 1979 ; Passet, 1996) cette notion est employée dans les systèmes d'exploitation de la biosphère pour désigner « la capacité de reproduction des principaux éléments qui les constituent (les ressources exploitées et le milieu naturel qui les abrite, les éléments économiques, sociaux et techniques) et des fonctionnalités qui les structurent ». Toute stratégie d'évaluation et de choix d'indicateurs de bouclage de flux de matière et d'énergie doit alors permettre de refléter l'État actuel, les changements et les caractéristiques structurelles de système.

La dimension économique analyse les enjeux associés au bouclage de flux des cycles biogéochimiques. Lesquels sont nombreux et variés. Cependant, en fonction des piliers de l'économie circulaire, ces enjeux peuvent être synthétisés suivant deux grands groupes d'objectifs : la préservation de la productivité des écosystèmes, le maintien de la rentabilité économique. La préservation de la productivité découle de la nécessité de sauvegarder les écosystèmes afin d'assurer les conditions favorables à la pérennité des matières premières pour les générations futures.

L'application du modèle d'économie circulaire a pour intérêt de faciliter l'identification et le choix d'un ensemble cohérent d'indicateurs interdépendants (système d'indicateurs) permettant la caractérisation des différentes dimensions de bouclage de flux de matière et d'énergie. Il est difficile de donner un jugement précis sur le bouclage de flux dans les compartiments de la biosphère tant que celle-ci n'est pas considérée en rapport avec les indicateurs classiques de flux proposé par l'écologie industrielle. Cependant, à la seule vue des variations des indicateurs de bouclage de flux dans les processus contrôlés pour l'homme ou de petit et de moyen cycle (cf. chapitré 2), il est souvent possible de mesurer le bouclage des certains processus en utilisant les indicateurs proposés par Liu Yifang et pour la fondation Ellen MacArthur, en fonction des sept piliers de l'économie circulaire, trois types de piliers peuvent être distingués pour classer plus directement le bouclage dans les cycles de l'azote : l'écologie industrielle et territoriale, le recyclage et la valorisation des déchets et l'approvisionnement durable.

Avant d'appliquer ces indicateurs, il est nécessaire de faire un diagnostic sur le statut d'un système donné ou de ses différentes composantes. Dans le cas de la durabilité des matières premières, le statut renvoie au jugement possible sur la variation des quantités et la relation de valeur des ressources naturelles. Ces relations sont examinées dans les chapitres suivants, selon le modèle input-output et la production jointe.

La cinquième partie de la thèse consiste à faire une application du cadre d'analyse aux opportunités d'une économie circulaire à Paris.

Dans notre cas d'étude, l'usage de la production jointe permet de donner un cadre formel dans l'analyse et les réflexions sur le flux de matière et d'énergie et les systèmes de valeur associés à ce flux. On peut choisir de représenter tout même les flux de l'azote et d'autres ressources écologiques, mais alors cela signifie qu'un prix leur est attribué. Que signifie ce prix? Si les ressources écologiques ne sont pas produites, et servent donc d'apport extérieur pour le système économique, le prix correspond à une rente, c'est-à-dire à un prélèvement du surplus en faveur du possesseur de la ressource écologique. Si les ressources écologiques sont produites, le prix incorporera les échanges nécessaires à la reproduction du système et s'il y a un taux de profit positif, il incorporera aussi la valeur d'une part du surplus.

Répondrons alors à la question suivante : ***quel projet de transformation du centre Ivry-Paris XIII pour demain, alors que la gouvernance sur les frontières entre l'économie et l'environnement évolue ?***

Pour répondre à cette question, nous avons exploré trois cas d'étude :

- Le cas d'une mise en décharge du déchet sans mécanismes de bouclage.
- Le cas d'un compostage urbain qui considère un bouclage de flux de la matière.

D'après Sraffa, les ressources écologiques du système économique sont possédées par quelqu'un qui va les échanger sur un marché avec d'autres marchandises. Mais si elles ne sont possédées par personne pourquoi accepterions-nous de payer pour leur utilisation ? En revanche, les déchets et les pollutions ne sont pas représentés dans le système économique, car ils ne sont pas considérés comme des marchandises,

contrairement aux services de dépollutions, de recyclage ou de traitement de déchets qui peuvent être inclus dans le système comme dans le 3ème cas de la typologie de Jason Moore (2015).

- Le cas d'une incinération de déchets qui examine un bouclage de flux d'énergie.

Un système vivant apparait dépendant de l'énergie solaire : cependant cette hypothèse ne peut être validée que si un modèle physique explique précisément comment l'énergie solaire sert à la régénération des plantes et des herbivores. Peut-on dériver de ce système, qui se perpétue de façon autonome, un système de production humaine d'énergie?

Nous nous proposons maintenant de répondre à ces questions. Les résultats montrent que le cas d'une mise en décharge ne produit pas de récupération, de valorisation ou de recyclage des déchets donc =0 et =0. En conséquence, les valeurs de *CL*=0 et du *MCI*=0 sont représentent par une boucle ouverte.

Cette évolution des ressources dans un cas sans bouclage de flux de matière a été explorée à travers une itération des biens dans le temps. Elle a permis d'étudier les variations de 4cheaps dans un cadre de production jointe comme une augmentation de la consommation de l'azote ou une prédation pure, selon le classement qui a été proposé pour Moore en 2015.

L'incinération montre une augmentation dans la circularité du système par rapport au compostage, la valeur de *CL* est comprise entre 0 et 1. Cet écart s'explique pour partie par l'incorporation des processus qui représentent le cycle moyen. Il s'agit de processus partiellement gérés par la nature comme le compostage urbain, qui peuvent être considérés comme constituant de la nature domestiquée. Ces processus sont pilotés par l'homme, mais ils ne sont pas maîtrisés par celui-ci du début à la fin, cf. chapitre II.

Comme dans l'indicateur CL, les résultats montrent que la mise en décharge ne produit pas de récupération, de valorisation ou de recyclage des déchets donc *LFI* et *MCI* sont 0.

Dans le compostage, l'indicateur du *MCI* capte la circularité des flux matériels du compostage avec un ratio de 46% en utilisant directement une partie des déchets comme input pour la production de la ressource 6 (compost). On peut remarquer que cet indicateur pourrait capter implicitement le bouclage de certains flux de la production agricole et du métabolisme urbain comme l'utilisation du déchet végétal dans la préparation du sol avec l'incorporation d'azote du compost.

En outre, l'indicateur du *MCI* a montré les résultats pour une boucle d'énergie en incluant l'incinération des déchets qui utilise la ville comme fond, dont la fonction est de produire de l'énergie qui va être utilisée par les autres processus du système. La valeur de 63% du *MCI* représente une boucle plus serrée que les autres variations grâce à la contribution du processus de valorisation énergétique. Mais il a été compliqué d'utiliser un indicateur de bouclages des flux matériels car il s'agit d'un bouclage énergétique, pourtant, nous constatons que nous sommes loin de pouvoir inclure toutes les réactions entropiques d'énergie et le bouclage des flux non humaines comme l'eutrophisation ou le flux d'azote comme la pluie acide en utilisant un indicateur très agrégé.

Sur la base des résultats des indicateurs, nos trois cas d'étude correspondent à des configurations variées des flux sur le même territoire.

Le passage de l'incinération vers une variation plus vertueuse de compostage urbain a été fait en utilisant un compostage urbain de proximité (bénévole) avec un taux de profit Sraffien égal à zéro. Comme l'a dit Cadillon (2002), nous devons constater que le prix de vente du compost pose un problème d'équilibre financier dans le système de la valeur du compostage et donc, éventuellement des subventions seront nécessaires à sa bonne marche. Ensuite la tonne de compost écoulée peut être subventionnée, à hauteur du prix de la mise en décharge.

Nous serons également en mesure de proposer une subvention alternative au compostage de proximité donc, un compostage industriel qui pourra être réalisé par une entreprise de recyclage et de récupération des déchets verts comme Bio Yvelines Services. Par ailleurs, la transition vers l'incinération peut être gérée par l'agence métropolitaine des déchets ménagers (Syctom).

Le projet de reconstruction de l'usine de traitement d'Ivry-Paris XIII montre aussi une certaine complexité d'interaction entre acteurs publics, privés, et la société civile, qui pose la question des capacités de concertation de l'État. En ce sens, les discussions passées et les possibles futures évolutions du dialogue social entre les acteurs ne sont pas considérées dans notre périmètre d'étude.

Nous avons évoqué qu'il n'y avait aucun mécanisme formel qui assure la même rentabilité des processus dans l'expression comptable de taux de profit associé à une même productivité marginale du capital pour l'ensemble du système de la valeur (Passinetti, 1985). L'égalisation de taux de profit est donc le résultat le moins logique dans un système caractérisé par un taux de profit pour le salaire dans un secteur en reproduction externe qui peut être égal à zéro et à des prix internes du système qui seront en concurrence. Comme nous l'avons vu précédemment, la relation entre prix et taux de profit non égale est très complexe. Pour pouvoir étudier les résultats, nous avons réutilisé le concept des produits fondamentaux et non fondamentaux du chapitre V. Nous avons observé la même courbe d'hyperbole dans la mise en décharge et le compostage urbain qui peut être la cause de l'utilisation d'un seul input dans la première ligne de la matrice de dimension 2x2. Par contre, le processus d'incinération a utilisé deux inputs dans la première ligne, ce qui a provoqué un autre comportement asymptotique de l'hyperbole, cela peut s'expliquer pour l'existence d'une réutilisation d'une ressource énergétique qui va être formalisée comme un input dans la structure matricielle. Comme nous l'avons déjà mentionné, ces taux de rendement inégaux nécessitent désormais un réexamen critique de toute une série de cas d'école, considérant une séparation entre matière et énergie dans une structure avec des propriétés matricielles décomposables.

Comme on peut le constater, ce mécanisme d'instrumentalisation de l'économie considère l'internalisation de la nature et de la force de travail dans le système de la valeur, l'externalisation des déchets ultimes et l'élargissement des frontières de l'exploitation. Le mécanisme revendique le concept de la valeur d'usage de Marx qui intègre la nature dans le système de production capitaliste et instrumentalise les processus qui ont été jusqu'à présent autonomes comme les processus sauvages. Il s'agit des processus que ne sont pas inclus dans le système économique comme la reproduction d'une force de travail comme un fond externe au système. Dans ce sens, le paradigme de l'économie circulaire fonctionne en même temps, comme une partie du système d'instrumentalisation de l'environnement et comme une partie du système de protection de la nature.

ENGLISH VERSION

Research on the opportunities to build institutional and economic "value loops" which will internalize opportunities for circular economics: A case study of household waste management in centre Ivry – Paris XIII

Keybords : Biogeochemical cycles, input-output model, joint production theory and circular economics.

Abstract

This thesis attempts to evaluate the opportunities of the circular economy at the territorial scale and to engage the role of biogeochemical cycles, economic systems and the institutional boundaries between the environment and the economy, during the transformation project of the waste treatment center at Ivry-Paris XVIII.

To achieve this thesis, three different dimensions can be taken into consideration. The first one, inspired by the definition of biosphere proposed by Vernadsky, analyzes the pathways of molecules such as nitrogen in the biosphere. The second one, closer to the perspective supported by Sraffa and Leontief, leads to reconstruct a history of economics based on the interface between economy and environment. The third one, inspired by Moore's dialectical method, is to confront the positioning of the actors around the regulation of the boundaries between the processes of appropriation of the economy and the preservation of the environment.

1. Introduction

The first part of the thesis aims at confronting the production of the past scientific review with the actual knowledge about three dimensions.

On the first dimension of our thesis, the physical description of the biogeochemical cycles that we have proposed aims at clarifying the structure and the exchanges between the components of the system which helped to make the analysis of the opportunities for change or improvement in the physical flows in the cycles possible. This change has determined nature, limits and dimensions of the cycles.

It is particularly difficult to give a global, fixed and homogeneous view of the current configuration of each cycle, as it has been pointed out by many researchers, from the beginning of the climate change issue. Our analysis, however, tends to emphasize the alteration of natural cycles and, as long as the biosphere seems to be still dependent on the physicochemical parameters of each of the compartments of the Earth, as the atmosphere, the lithosphere and the hydrofoil.

2. Circular economy background

2.1 The Biosphere: *what circularity does occur in the great cycles of the biosphere?*

Like the analysis of debates on Anthropocene, the evolution of cycles is currently undergoing a phase of development in which the convention is no longer industrial, as was the case during the Industrial Revolution. The development of more sustainable activities is seen as an opportunity in a vision of the green economy in this respect. For example, the extractive system of raw materials based on nitrogen and phosphorous economy becomes highly entropy. Then, the question arises whether the rural and urban economy has made optimum use of resources.

A prospective hypothesis, in case of the linear economy, is that the use of raw materials is based on their consumption and on a production of waste thrown into the biosphere. However, the biosphere does not seem to assume completely to be on this linear path as it is also determined by cycles.

From the theoretical point of view, the heterogeneous cycle pathways have difficulty in overcoming high complex structuring which generally has only limited to the biophysical questions, which is far from a framework that integrates other, more socio-economic areas that expand the field of analysis from nature-nature relationships towards nature-human relationships.

If we reason from nature-nature relations, we can see that certain paths of molecules can be circular and/or linear as a function of the cycle temporality. From this perspective, the annual cycle of agriculture involves extremely intensive use of chemicals that pollute soils and streams based on very long cycles such as the natural synthesis of nitrogen and phosphorus. This notion of cycle time has helped us to frame the discussions on measuring the cycles of part III of the thesis. That third part provides a framework for a conceptual understanding of possible opportunities for circular economy In Paris which have been analyzed in Part V of the thesis.

2.2 Close de loops : *could framework of sustainable analysis represent contextually the circular economy?*

The question of the need for a holistic approach to studying the cycles of nature is as old as the economy. What is at stake behind capitalism, it is its capacity to carry life; we refer to René Passet's book The Economics and the Living (Payot, 1979, Passet 1996). René Passet expresses the concept of a greenhouse of economic activity in the great loops of the biosphere (Passet, 1996) in order to answer his question. It is therefore necessary to take a holistic view of the concepts used for ecological economics and the industrial ecology.

In the case of recycling in ecological economics, by integrating biosphere processes to form virtuous loops, the circular economy leads to a reduction in the consumption of exhaustible natural resources by shifting to environmental systems, reducing the consumption of exhaustible fossil fuels and decreasing the net emissions of material waste.

In the case of recycling in industrial ecology, through economic processes in loops, the circular economy leads to a reduction in the consumption of resources. However, it is not enough to correct the situation of the close the loops, it will be equally important to reinforce the policies aimed at promoting a

deindustrialized economy, more low carbon, saving energy and non-renewable natural resources like Nitrogen and phosphorus.

In this context, the circular economy is, on the one hand, a concrete and political application of industrial ecology. It means recycling and re-use material, applying energy efficiency and clean technologies. On the other hand, it seems appropriate to integrate the thermodynamics vision of the open systems, which suggests the way that does not accelerate the entropic processes on our planet.

Back to square one: The holistic approach makes it possible to integrate the ecological and industrial visions in a transversal framework to the ecological, economic, biophysical and institutional stakes. To the slowness inherent in institutional change it is possible to add the difficulty to balance the relations between the economic actors of the circular economy development policy and the protagonists. What can be observed is the permanent relationship of domination of the elites and the scientific and economic sectors, over small users and organized civil society.

On the second dimension of our thesis, many researchers have expressed their agreement that the input-output analysis, in fact, largely exceeds the activities of his author Leontief. It means that the evolution of input-output analysis (I/O) between 1920 and 1950 is also linked to the transformations of economic science.

in this regard, some authors have used environmental sectors in the model; Cumberland in 1966 integrates the environmental sectors into the I/O model using a model industry by industry. In value terms, it adds environmental benefits, environmental costs and environmental restoration costs.

Walter Isard in 1968 and later Peter Victor in 1972 presented the matter and energy flux between the economic system and the ecological system in a table of commodities by industry. Isard is known primarily as the founder of regional science, which focuses on ecological and environmental analysis and resource management using I/O analysis.

In 1969, the Ayres-Kneese model integrates the first law and the second law of thermodynamics into the Daly model in industry by industry table, thus eliminating pollutants, recycling and preserving matter.

Today, the model has been expanded, as for example the measurement of waste flow in the Waste Input-Output Analysis (WAI) (Nakamura *et al.* 2002), application to the life cycle analysis (Takase *et al.* 2005).

In our study, the use of I/O models allows to give a formal framework in the analysis and the reflections on matter and energy flows into the biosphere. In this sense, Chapter VI presents a typology of four I/O system structures to formalize physical economic relations. This chapter leads to the development and quantification of a commodities and processes matrix using the model of Isard (1968) and Victor (1972). These are the quantities of the various goods produced, pollutants emitted, waste recycled and valorized by the intermediate consumption sectors.

Sraffa leading author of our economic approach, allowed us to reconstruct a value theory history through joint production theory. Chapter V presented the main message of Sraffa's work and how it is understood in relation to certain important works in Ricardo, marginalists and Von Neumann value theories.

2.3 Value system theory : *what value system is presented in the close the loop between nature and the economy?*

A value theory means that a value is attributed to each commodity (good or service) produced by the system, so that each commodity can be exchanged for a quantity of other commodity. It is generally assumed that each unit of commodity has the same value. In Sraffa's theory, value means the exchange ratio, which would allow to reproduce the system and distribute the entire surplus to the different agents (wage-earners, capitalists, renters and the state also if taxes are introduced.

In our thesis, the use of the joint production approach makes it possible to give a framework on the value relations between the economic system and the biosphere. It is difficult to give a precise judgment on joint flow of commodities or natural resources in the biosphere compartments as long as this is not considered in connection with the commodity value or natural resources. In this sense, Chapter VIII presented a typology that tried to structure the matter and energy flows in an entropic universe in ten different paths.

Chapters XII and XIII have led to the development of a set of processes and transfers of interrelated physical production. It also establishes eight hypothesis that have been explored in Chapter V. We use these assumptions to calculate the relative prices of resources, waste, labor, capital and energy in a production system.

On the other hand, it is illusory to believe that if ecological resources are integrated, prices will be fairer or more sustainable. We can even choose to represent the ecological resources, but then it means that a price has been attributed. What does this prix or value relation mean? If ecological resources are not produced in a factory and therefore serve as an external contribution to the economic system, the price corresponds to a rent or surplus to the ecological resource owner. If the ecological resources are produced in the exchange system, the price will incorporate the trade needed to reproduce the system and if there is a positive rate of profit, it will also incorporate the value of a share of the surplus. In this sense, Chapter XII is devoted to the analysis of these relations using price iterations method. It is also an opportunity to test the capacity of the joint production process to provide a framework for analyzing the sharing of resources between economic and biosphere processes, taking into account the various temporal scales of economic and natural processes.

On the third dimension of our thesis, chapter VI represents a way of integrating the relations between the exchange value system for the biosphere and economics in Marxist vision of the regulation system. This system of regulation is an expression of functioning of a subset of human societies and also reflects the fundamentally asymmetrical relations maintained by the capitalism system between the biosphere and the economy. We must distinguish two forms of appropriation. The first one is the way in which reproduction processes such as labor, forestry and agriculture are being used and maintained. The second one corresponds to the geological extraction of matter and energy.

The natural capital appropriation process uses four basic inputs or four cheaps in Moore's language such as labor, food, energy and raw materials (Moore, 2015). The synchronized use of four components generates and maintains a virtuous productive dynamic, which generates rising profits.

This type of expansion process and biosphere appropriation has been expressed most dramatically in the conquest of the Americas for the European powers through a mechanism of nature instrumentalization (Moore 2010a, 2010b). This mechanism has already been described in Chapter VI and It considered two stages: the internalization of nature in the value system with the waste outsourcing and the widening of the exploitation boundaries.

In this sense, the capitalism problem today is that the appropriation opportunities of the productive assets, that are close to their borders in the exploitation zone, are drastically reduced. As a result, the regulatory system is not able to control the borders of investment and appropriation of ecological capital.

3. Methodology

The fourth part of the thesis aims at proposing a conceptual framework of analysis. This framework has been summarized in a flow chart (beginning of part IV), which shows the successive or simultaneous steps to develop its strategy of circular economy using the three analysis dimensions, including economic, biophysical and institutional dimensions.

The first part of the economic dimension suggests an intersectoral models typology of I/O type. The use of I/O models provides a formal framework for the analysis and reflection on the flow of matter and energy from the biosphere. In this sense, Chapter VI presents I/O typology of four structures of the system to formalize physical economic relations using the approach proposed by for Walter Isard (1968) and later by Peter Victor (1972).

The second part of the economic dimension proposed a typology of joint production models. This chapter aims at addressing the physical interdependencies between economic and ecological systems linked to different value structures. The analysis in terms of value makes it possible to understand how the surplus is distributed among the economic actors: the incorporation of ecological resources, or pollution, will mean that the surplus will be exchanged directly between a greater number of actors. This can be interesting in order to protect natural resources (if they have a price, we can use profit to finance their protection). But we can also choose to invest to protect nature without attribution of the price.

This section proposes a classification of structures to represent cyclical and cascading paths of biosphere resources. In this sense, the structure distinguishes three types of thermodynamic systems: the isolated system, the closed system and the open system, which exchanges matter and energy with the environment outside the system. The classification is enriched by the work carried out for O'Connor *et al.* (2009) on the processes present in the small, medium and large cycles and also in the relations between matter, energy and thermodynamics proposed for Prigogine (Prigogine, 1967 Morowitz, 1968, Ulanowicz, 1983).

In this context, the thesis proposes a typology of ten structures of the system to formalize economic-physical relations. Beyond this typology, the conceptual framework of the nitrogen cycle was formalized on a cycle and a cascade structure using the ePLANETe software with the indicator gallery or KIKs (see annex to Chapter VIII on the structure of cycles and cascades in ePLANETe).

In this Sraffa's typology we have assumed that the surplus is divided among the capitalists, the workers and the rentiers, here the owners of energy. So how do we distribute the surplus processes of the

atmosphere, of the lithosphere? How can the approach be improved to better measurements of biogeochemical cycles?

We support in this section the need to answer this question. Reflective methods (Patterson, 2014) allow calculating the price and the efficiency of non-square matrices. The method of joint production (Sraffa, 1960) makes it possible to calculate the price and the profit rate of the square matrices. We can have the relative price or exchange relationship between the goods. Thus, the answers lead to the conclusion that a value system is difficult to measure different numeraire taking into account their thermodynamic and entropic characteristics.

The biophysical dimension analyzes the assessment approaches of biogeochemical cycles. In this perspective, the circular economy is based on seven pillars that correspond to the dimensions of which are indispensable in any process of circularity evaluation. These pillars are economic and social nature. They are not independent on each other, but rather marked by strong interactions which are the main problem when it comes to closing the loop. We try to conciliate interdependent and diverse objectives in order to analyze the pressures exerted on the socio-economic activities by the waste and the ecological footprint.

This seven-pillar vision is also valid in the biosphere, whose sustainability is in terms of co-viability. According to Passet (Payot, 1979, Passet, 1996), this notion is used in biosphere exploitation systems to denote "the reproductive capacity of the main elements that constitute them (the exploited resources and the natural environment that shelters them, the economic, social and technical elements) and the functionalities that structure them ". Then, any strategy for assessing and choosing indicators to close the loops of material and energy flows should reflect the current state, changes and structural characteristics of the system.

The economic dimension analyzes the stakes associated with the closure of the loops of biogeochemical cycles which are numerous and varied. However, depending on the pillars of the circular economy, these issues can be summarized in two main groups: preserving the productivity of ecosystems and maintaining economic profitability. Productivity preservation stems from the need to safeguard ecosystems in order to ensure favorable sustainability conditions of raw materials for future generations.

The application of the circular economy model has the advantage of facilitating the identification and selection of a coherent set of interdependent indicators (system of indicators) enabling the characterization of the different dimensions of the close of material and energy flows. It is difficult to give a precise judgment on the close the loops in the biosphere compartments until it is not considered in relation to the classical flow indicators proposed by industrial ecology. However, if we measure the variation only in the human controlled processes of the small and medium cycle (see Chapter II),it is often possible to measure the closure of the loops of certain processes using indicators proposed by Liu Yifang and the Ellen MacArthur Foundation. According to the seven pillars of the circular economy, three types of pillars can be distinguished to classify close the loop more directly in nitrogen cycles: such as industrial ecology, recycling and recovery of waste and sustainable supply chain.

Before applying these indicators, it is necessary to make a diagnosis on the status of a given system or their components. In the case of raw material sustainability, the status refers to the quantities variation and the value relationship of natural resources. These relationships are discussed in following chapters, according to the I/O model and the joint production model.

The fifth part of the thesis contains the application of the analytical framework to the opportunities of a circular economy in Paris.

In our case study, the use of the joint production makes it possible to give a formal framework in the analysis of close the loops of matter and energy and the evaluation of value systems associated with this flow. It is possible to represent nitrogen and other ecological resources, but then it means that they get a price. What does this price mean? If ecological resources are not produced, and therefore serve as an external contribution to the economic system, the price corresponds to a rent, that is to say, to a profit for the ecological resource owner. If the ecological resources are produced, the price will incorporate the trade needed to system reproduce if there is a positive rate of profit, it will also incorporate the value of a share of the surplus.

4. Case of study: *What Ivry-Paris XIII plant project would suit for tomorrow?*

To answer this question, we explored three cases of study:

- ***The case of landfilling of waste without looping mechanisms.***

- ***The case of urban composting which considers close the loops of the matter flow.***

According to Sraffa, the ecological resources in the economic system are owned by someone who will trade them in a market with other goods. But if they are not owned by anyone why would we accept paying for their use? On the other hand, wastes and pollution are not represented in the economic system, as they are not regarded as commodities as opposed to the depollution services, recycling or waste treatment services which can be included in the system as in the 3rd case of the typology of Jason Moore (2015).

- ***The case of incineration of waste which examines looping of energy flows.***

A living system appears dependent on solar energy. However, this hypothesis can only be validated once a physical model explains precisely how solar energy is being used for the plants regeneration and herbivores. Can we derive from this system, which perpetuates itself autonomously, a system of human energy production?

We will try to answer these questions. The results show that the case of a landfill does not produce recovery nor recycling of wastes therefore $\alpha = 0$ and $\beta = 0$. Consequently, the values of $CL = 0$ and $MCI = 0$ are represented by an open loop.

This evolution of resources in a case without closing the material flow has been explored through an iteration of goods over time. It has allowed the study of variations in shifts in a joint production framework such as an increase in nitrogen consumption or pure predation, according to the typology proposed for Moore (2015).

The Incineration shows an increase in the system circularity compared to composting process, therefore *CL* value is between 0 and 1. This discrepancy is partly explained by the incorporation of the processes representing the medium cycle. These are processes partially managed by nature such as urban composting, which can be considered as constituting domesticated nature. These processes are man-driven, but they are not controlled by it from the beginning to the end, cf. Chapter II.

As in the *CL* indicator, the results show that a landfill does not produce waste recovery or recycling, so *LFI* and *MCI* are 0.

In composting, the *MCI* indicator captures the circularity of the composted material with a ratio of 46% directly using a part of the waste as the input for the production of resource 6 (compost). It can be noted that this indicator could implicitly capture the closure of agricultural production and urban metabolism flows such as the use of vegetable waste in the soil preparation with the incorporation of compost nitrogen.

In addition, the *MCI* indicator showed the results for an energy loop including incineration of waste that uses the city as a bottom, whose function is to produce energy that will be used by other processes of the system. The 63% value of *MCI* represents a firmer loop than the other variations due to the contribution of the energy recovery process. However, it has been complicated to use an indicator of loopback of material flows because it is an energy loop. Yet we find that we are far from being able to include all the entropic reactions of energy and the closure of non Human flows such as eutrophication or nitrogen flux (for instance acid rain) using a highly aggregated indicator.

On the basis of the results of the indicators, our three case studies correspond to different flows configurations in the same territory.

The move from incineration to urban composting has been explained on the basis of non-profit urban composting. This volunteer characteristic of the house composting can be illustrated by a Sraffian profit rate equal to zero. As Cadillon (2002) has said, we must note that the selling price of compost poses a financial problem in the value system and hence subsidies will be necessary for its smooth running. Then, the ton of compost can be subsidized, at the price of a landfill.

We will also be able to propose an alternative subsidy to household composting therefore; an industrial composting that can be carried out by a recycling company such as Bio Yvelines Services. In addition, the transition to the incineration can be managed by the Metropolitan Household Waste Agency (Syctom).

The project of rebuilding the Ivry-Paris XIII treatment plant also shows a certain complexity of interaction between public and private actors and civil society, which raises the question of the state's capacity for a public discussion. In this sense, past discussions and possible future developments in social dialogue between the actors are not considered within our study scope.

We have argued that there is no formal mechanism that ensures the same rate of profit for the whole value system (Passinetti, 1985). The equalization of the profit rate is therefore the least logical result in a system characterized by a rate of profit for an external reproduction sector which can be equal to zero and to internal prices of the system characterized by profit rate different from zero. As we have seen

earlier, the relationship between price and non-equal profit rate is very complex. In order to study the results, we re-used the concept of non-fundamental products studied in Chapter V. We have observed the same hyperbola curve in landfilling and urban composting that may be the cause of the use of a single input in the first line of the matrix of dimension 2x2. On the other hand, the incineration process used two inputs in the first line, which has caused another asymptotic behavior of the hyperbola; this can be explained by the existence of energy reuse that goes be formalized as an input in the matrix structure. As already mentioned, these unequal rates of return require a critical re-examination of a whole series of school cases, considering a separation between matter and energy using structure with decomposable matrix properties.

Finally, this appropriation mechanism of the economy considers the internalization of nature and labor power in the value system, the outsourcing of ultimate waste and the widening of the economy borders of exploitation. The mechanism, inspired by Marx's value use concept which integrates nature into the capitalist systemalso reflects the claim to integrate processes that have been considered as autonomous up to now as for instance wild processes . These processes are not included in the economic system, as the labor force reproduction as a external fund to the system. In this sense, the paradigm of the circular economy operates, at the same time, as part of the system of co-option of the environment and as part of the system of protection of nature.

Perspective de recherche.

Parce qu'une thèse est aussi le prélude de recherches à venir, je souhaiterai d'abord évoquer quelques axes d'amélioration et de réflexion qui ont déjà été abordés pendant cette thèse.

Dans une future version des chapitres 9 et 10, ces outils intégreront indicateurs composes pour analyser le bouclage de flux en utilisant l'actif-passif des cycles, déjà propose dans la thèse de Richard Loiret.

Je souhaiterai maintenant évoquer quelques axes d'amélioration et de réflexion qui doivent être abordés à l'avenir.

En effet, il serait intéressant d'intégrer d'autres dynamiques telles que celles des salaires, du capital fixe, des investissements en infrastructure dans les analyses de bouclage de flux.

Il serait aussi judicieux de différencier l'utilisation d'un service de travail des ménages et d'un fond de travail externe dans notre analyse, notamment dans le chapitre 13.

Enfin, il serait opportun d'intégrer formellement la structure d'appropriation des *four cheaps* dans un modèle de production jointe, pour étudier la relation entre les prix relatifs, le taux de surplus et les mécanismes d'instrumentation. Si Nous voulons élargir notre système de prix pour intégrer les grands cycles de la biosphère dans leur totalité. Il faut proposer un système de régulation pour rendre opérationnelles les relations de valeur en échange pour les domaines externes au système comme proposé Jason Moore (2015).

Pistes:

La théorie du système complexe permet d'analyser les interactions entre les composants du système. Ouchi en 1979[143] distingue trois mécanismes pour analyser cette interaction : mesure des comportements des composants du système, mesure des extrants (output) et contrôle par le clan donc définir et faire suivre les règles. Il montre que l'efficience de chacun de ces mécanismes dépend du degré de connaissance du processus de transformation et de la possibilité de mesurer avec une relative précision les extrants (Bessire *et al.* 2011) [144].

En outre, nous avons évoqué dans les chapitres précédents la présumée égalisation des taux de profit de rendements de processus. Mais il n'avait aucun mécanisme formel qu'assure la même rentabilité des processus. Tous ces taux de rendement inégaux désormais nécessitent un réexamen critique de toute une série des cas d'école, considérant une séparation entre matière et énergie dans une structure avec des propriétés matricielles décomposables.

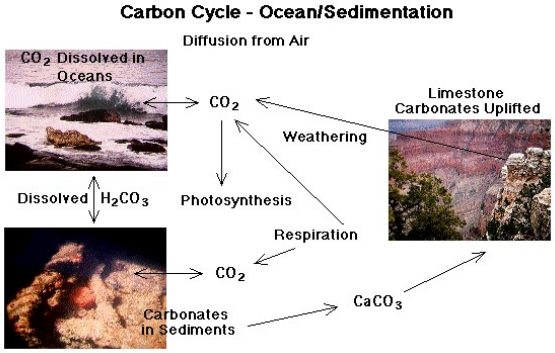
[143] Ouchi, W.G. 1979. A conceptual framework for the design of organizational control mechanisms. Management Science , vol. 25, n° 9, September, 833-848.

[144] Dominique Bessire et Pascal Fabre. 2011. Enjeux et limites du pilotage par les indicateurs en management public, l'exemple de la recherche en sciences de gestion.

ANNEXE

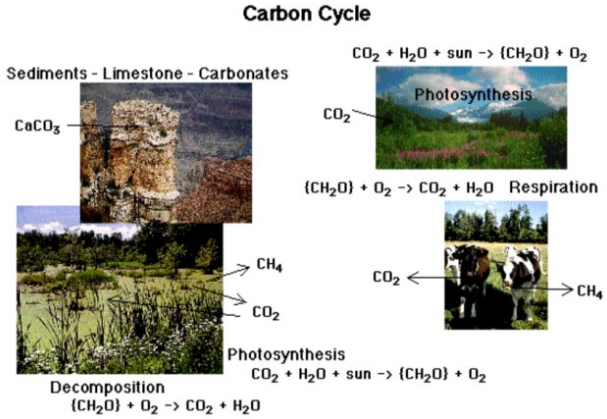
I.A : Le cycle du Carbone

Figure I.A.I: CO_2 immobilisée dans l'océan comme CaCO3



Source : elmhurst [145]

Figure I.A.II: La photosynthèse, la respiration et le stockage dans la lithosphère.

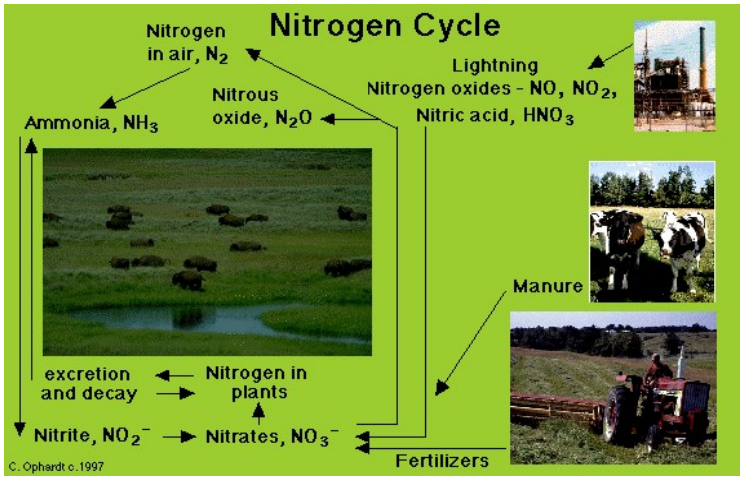


Source : elmhurst [14]

[145] Les flux sont en teragrames (10^{15}) de carbone par année. Les donnes peuvent être trouvées en : *http://www.elmhurst.edu/~chm/vchembook/305naturalcycles.html* (site consulté le 3 juin 2015).

I.B : Le cycle de l'azote

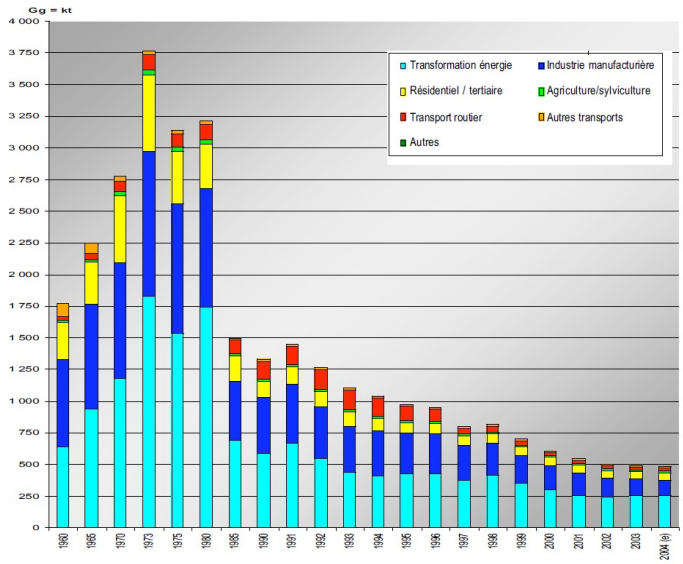
Figure I.B.I: L'ammoniac d'origine agricole



Source : elmhurst.edu [146]

I.C : Le cycle du soufre

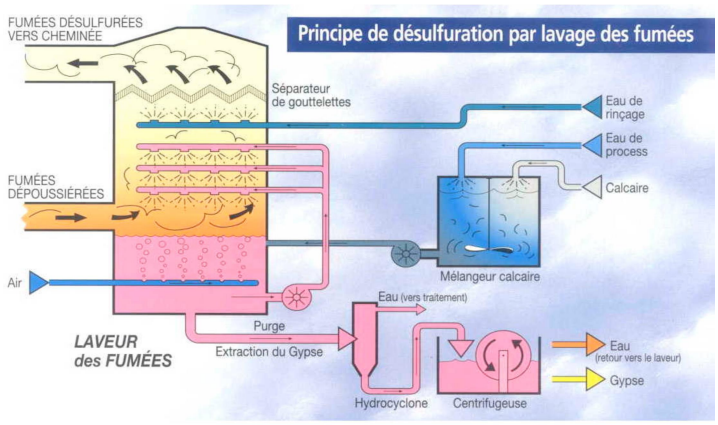
Figure I.C.I: Émissions de SO_2 dans l'air en France métropolitaine



Source : OUDART, 2005

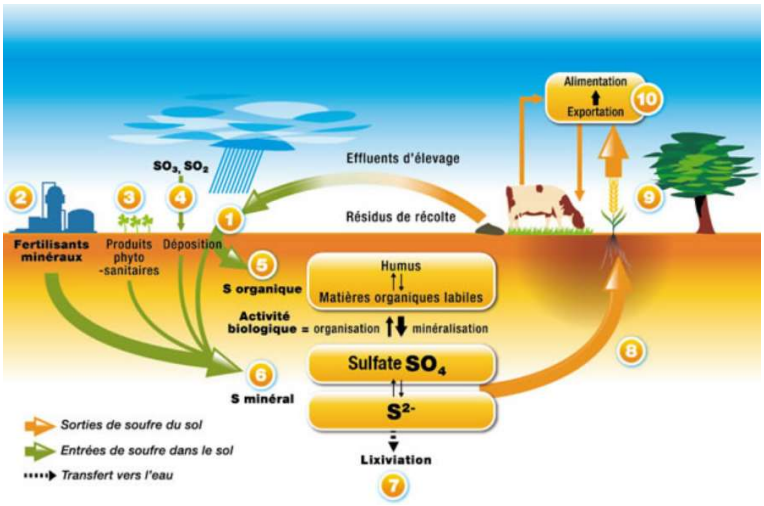
[146] Les flux de l'azote agricole peuvent être trouvés en : http://www.elmhurst.edu/~chm/vchembook/305naturalcycles.html (site consulté le 5 juin 2015).

Figure I.C.II: La désulfuration par lavage des fumées.



Source : (Joos, 2005)

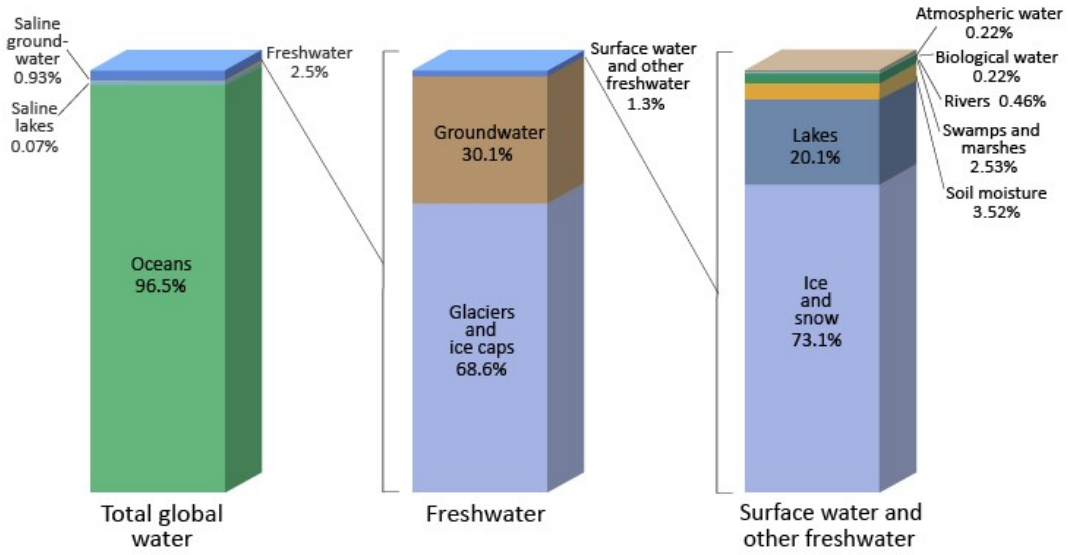
Figure I.C.III: Le cycle du soufre dans l'agriculture



Source : UNIFA (Union des industries de la fertilisation)

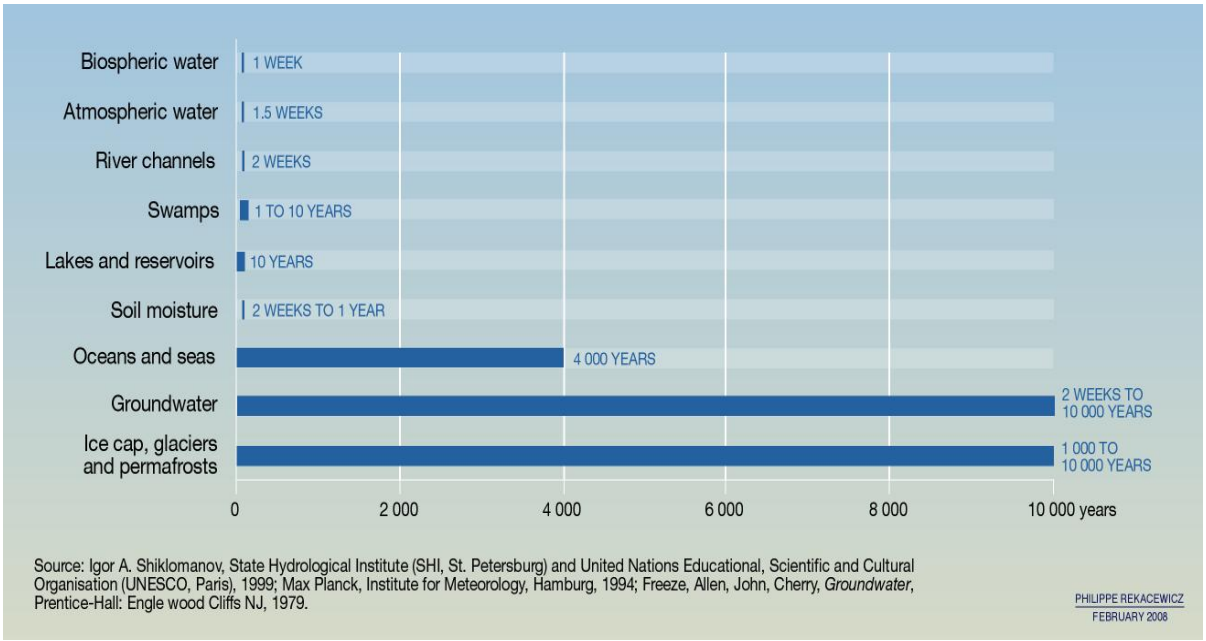
I.D : Le cycle de l'eau

Figure I.D.I: Quantité globale de l'eau



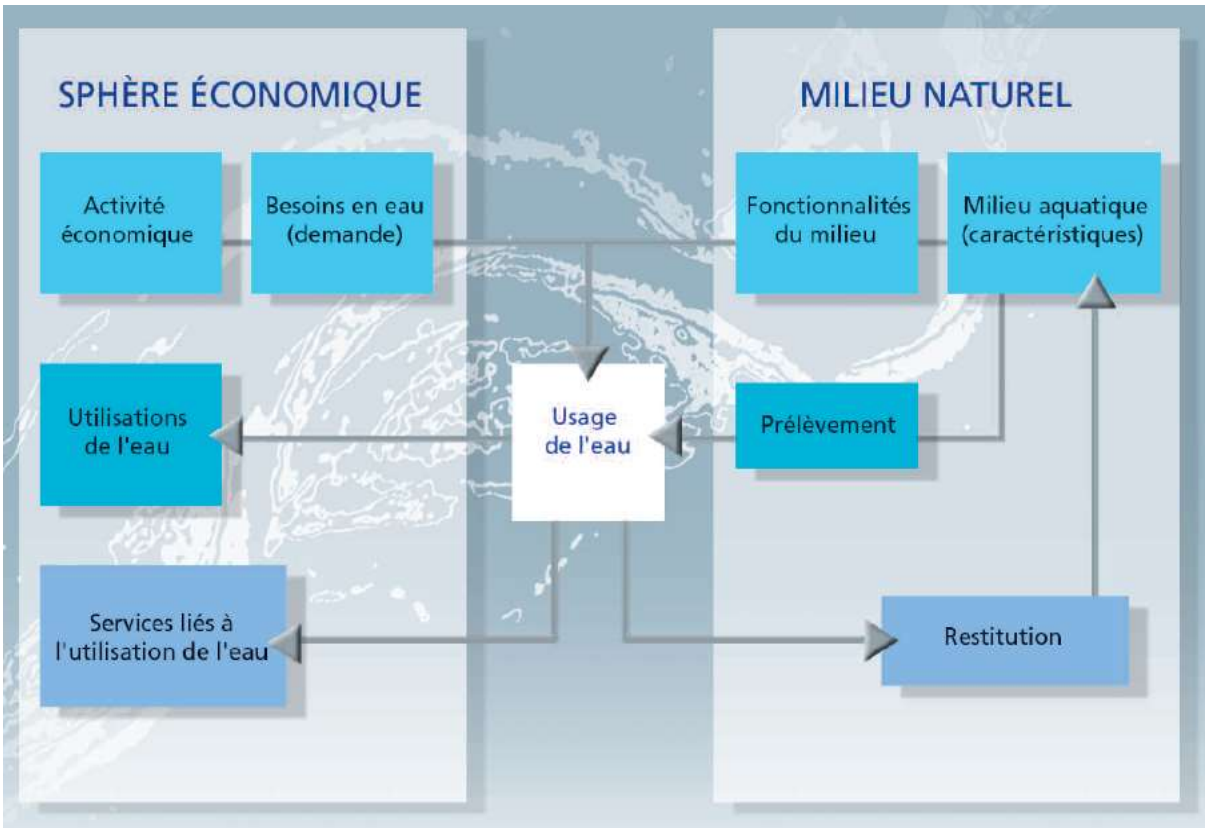
Source : Shiklomanov's *et al.* 1993

Figure I.D.II: La temporalité du cycle de l'eau.



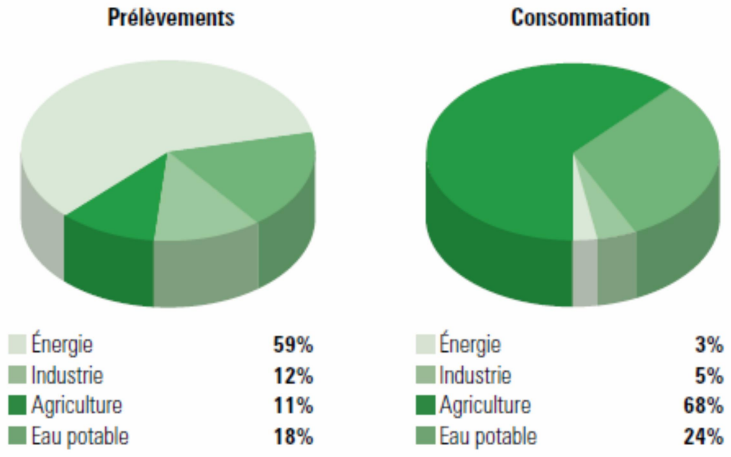
Source : UNEP, 2008

Figure I.D.III: Quel sont les usages d'eau ?



Source : CPA SAGE – Onema, consulté sur le site : http://www.onema.fr/sites/default/files/pdf/chapitre1-2.pdf (site consulté le 26 juin 2015).

Figure I.D.IV : Les utilisations de l'eau dans la production



(Source : Chiffres clés IFEN 2002, MSI ÉTUDE)

II.A Le modèle *Fund-Flow* et les phases des processus

Le processus peut être classifié par rapport à leurs phases, pour exemple, les processus agricoles présentent des phases comme la préparation du sol, trace de parcelle, semis, arrosage, désherbage, traitement phytosanitaire, fumure, irrigation, récolte.

Piacentini propose une formalisation des processus, $i = 1,2,\text{K}\ ,n$ présente les phases, $j = 1,2,\text{K}\ ,k$ *les fond et* $l = 1,2,\text{K}\ ,f$ pour les flux.

Nous pouvons formuler les matrices $S_{k,n}$ et $A_{f,n}$ comme :

Phases	1, 2, . . . , n
Funds	1
	2
	⋮ $\ldots s_{ji} \ldots$
	k

Phases	1, 2, . . . , n
Flows	1
	2
	⋮ $\ldots a_{li} \ldots$
	f

La matrice S (supply) montre des informations concernant aux degrés de spécialisation des fonds, un fonds spécialisé considéré une matrice avec des éléments nuls dehors de la diagonale. Dans la matrice A on trouve d'éléments positifs associes aux inputs et négatives associes aux inputs (Piacentini, 1995).

III.A : Les secteurs prioritaires pour une économie circulaire

Produit prioritaires	*Matériaux prioritaires*
L'emballage du produit	matières plastiques; bois ; papier et carton ; verre ; aluminium ; acier
Alimentaire et déchets de l'alimentation	phosphore ; l'énergie ; biomasse
Télécommunications	Les terres rares ; or ; cuivre
Appareils électroménagers	Les combustibles fossiles ; caoutchouc ; acier ; aluminium ; cuivre
véhicules personnel, camions et motos	Combustibles fossiles; acier ; aluminium ; Les terres rares ; plastiques
moteur industriel, navires, trains et les avions	Les combustibles fossiles ; caoutchouc ; métaux (Acier, Aluminium, Cuivre) ; plastiques

meubles	(bois) y compris sylviculture résidus ; textiles ; aluminium ; acier ; plastique
Bâtiments et publique infrastructure	bois ; béton ; aluminium ; acier ; plastiques

Source : L'auteur avec des données de IEEP,2014.

III.B : L'enquête en ligne sur l'économie circulaire à l'Université de Lorraine

On peut trouver l'enquête en : *https://docs.google.com/forms/d/1Tm8W3hoc0NzDntO82jisH5lz5RE8jVxJ04JzVaWa8-E/viewform?pli=1* (site consulté le 5 août 2015).

III.C : Base des données biophysiques et des flux de matières.

Pour développement détaillé sur les base des données des cycles biogéochimiques, consulter les pages et les ouvrages suivantes:

http://epp.eurostat.ec.europa.eu/portal/page/portal/environment/introduction

http://ec.europa.eu/resource-efficient-europe/index_fr.htm

http://ec.europa.eu/environment/resource_effi ciency/re_platform/index_en.htm

http://ec.europa.eu/environment/newprg/index.htm

The opportunities to business of improving resource efficiency, 2013, AMEC *et al.* :

http://ec.europa.eu/environment/enveco/resource_efficiency/pdf/report_opportunities.pdf

Modelling the economic and environmental impacts of change in raw material consumption 2014, Cambridge Econometrics. Consulter en:

http://ec.europa.eu/environment/enveco/resource_efficiency/pdf/RMC.pdf

Flash Eurobarometer 388: Attitudes of Europeans towards waste management and resource efficiency, consulter en:

http://ec.europa.eu/public_opinion/archives/flash_arch_390_375_fr.htm

III.D : L'analyse SWOT appliqué à la gestion des déchets ménagers

La Commission européenne souligne les défis de recycler et réutiliser. Pour cet objectif, les gouvernements des villages européens ont utilisés l'analyse SWOT. Le principe du classement est le suivant:

Français	*Anglais*
La collecte séparée des déchets d'emballages et des documents imprimés	separate collection of packaging waste and printed materials
La réutilisation d'électroménager	reuse-shops
Le compostage au ménage	household compost
Le compostage déchets verts publiques	greenwaste composting
La collecte et la séparation des déchets verts	separately collected biowaste
Les centres de recyclage	recycling centers
L'application des régimes de tarification équitable (PAYT)	application of fair charging schemes (PAYT)
La collecte sélective et recyclage des déchets électriques et électroniques (WEEE)	separate collection and recycling of WEEE
La collecte et gestion environnementale des déchets domestiques dangereux	separate collection and environmental management of hazardous household
La collecte sélective et réutilisation / recyclage des déchets encombrants	separate collection and reuse/recycling of bulky household waste
La collecte sélective et réutilisation de textile / habillement	separate collection and reuse of textiles/clothing
La gestion durable de cycle de vie des véhicules (ELVS)	sustainable management of end of life vehicles (ELVS)
La gestion durable des déchets de la construction	sustainable management of construction and demolition waste
La gestion durable des huiles de friture usagée	sustainable management of used cooking oils

Source : ZERO WASTE PROJECT, 2015.

III.E : Codes des déchets

Figure III.3: Codes des déchets selon le code de l'environnement.

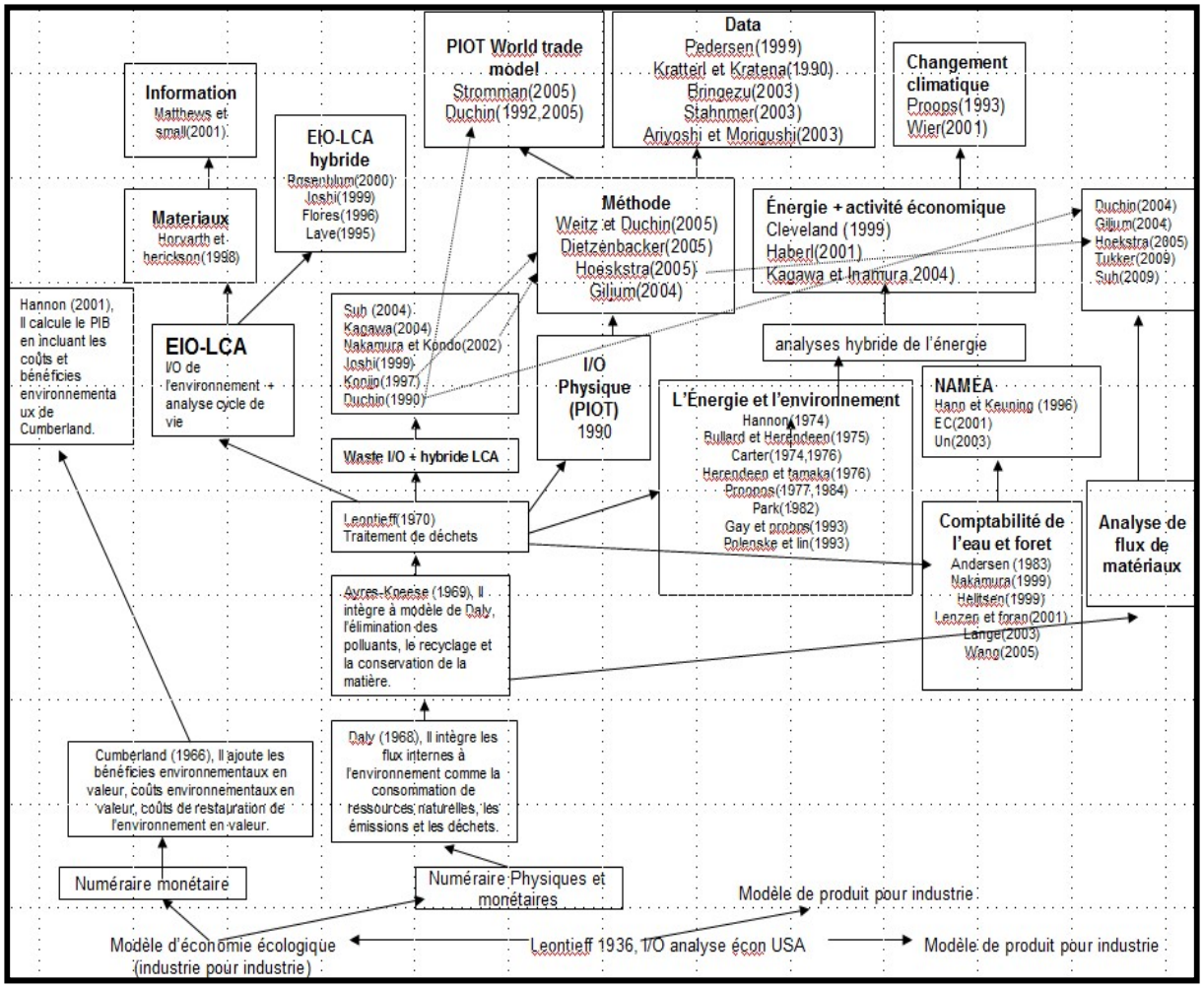
03 01	*Déchets provenant de la transformation du bois et de la fabrication de panneaux et de meubles :*
03 01 01	déchets d'écorce et de liège
03 01 04*	sciure de bois, copeaux, chutes, bois, panneaux de particules et placages contenant des substances dangereuses
03 01 05	sciure de bois, copeaux, chutes, bois, panneaux de particules et placages autres que ceux visés à la rubrique 03 01 04
03 03	*Déchets provenant de la production et de la transformation de papier, de carton et de pâte à papier :*
03 03 01	déchets d'écorce et de bois
15 01 03	emballages en bois
17	**Déchets de construction et de démollition (y compris déblais provenant de sites contaminés)**
17 02 01	bois
17 02 04*	bois, verre et matières plastiques contenant des substances dangereuses ou contaminés par de telles substances.
19 12	*Déchets provenant du traitement mécanique des déchets (par exemple : tri, broyage, compactage, granulation) non spécifiés ailleurs :*
19 12 06*	bois contenant des substances dangereuses
19 12 07	bois autres que ceux visés à la rubrique 19 12 06
20	**Déchets municipaux (déchets ménagers et déchets assimilés provenant des commerces, des industries et des administrations) y compris les fractions collectées séparément :**
20 01 37*	bois contenant des substances dangereuses
20 01 38	bois autres que ceux visés à la rubrique 20 01 37

Source : Déchets picardie[28]

IV.A : Evolution des modèles input-output de l'environnement

Nous avons compilé les modèles d'I/O dans leur séquence chronologique pour tâcher de mieux appréhender l'ouvre de Leontief et son héritage:

Figure IV.A. L'évolution de la méthode I/O



Source : L'auteur

VI.A : Grille de lecture historique de Fourth cheaps

FORCE DE TRAVAIL

	Reproduction est autonome de la circulation du capital 1450-1750	*L'environnement est considéré comme exogène 1800-2000*	*L'environnement est internalisé et financiarisé 1971-present*
force de travail	On a assisté entre 1450 et 1750 à une révolution qui s'est exprimée de la façon la plus dramatique dans la conquête des Amériques qui a été bien plus qu'une simple conquête militaire. Dans la vice-royauté du Pérou, par exemple, aux 16e et 17e siècles, les Castillans et les Espagnols avaient une expression spéciale pour désigner les indigènes : les *naturals* . Ces travailleurs et indigènes étaient considérés comme appartenant à l'ordre de la nature. Un repos (frontière des esclaves) en Afrique subsaharienne . On trouve le même type de phénomène avec l'esclavage des Africains. Le développement du commerce des esclaves est inséparable des plantations de canne à sucre et cela est très révélateur : non seulement on s'est approprié les sols et les forêts du Nouveau Monde et on les a exploité jusqu'à l'épuisement, mais les esclaves africains eux-mêmes ont été traités comme constituant une partie de la nature et non comme des hommes appartenant à une société. Chaque fois que de nouveaux empires se sont constituée, l'empire des Portugais sur le Nouveau Monde et l'océan Indien et des Espagnols, la première initiative était la collecte de tous les biens naturels qu'on pouvait trouver, incluant les hommes, et leur marchandisation, leur rationalisation. Ainsi, on assista à des processus extraordinaires de mobilisation de travail non payé au service de la production et de l'échange de marchandises.	Les nouveaux travailleurs , esclaves africains , deuxième génération des esclaves aux États-Unis , Cuba, le Brésil , la dépossession des enceintes parlementaires de paysans dépossédés en l'Angleterre coloniale.	Les coûts du travail ont été considérablement réduits par les offensives de classe bourgeoise contre le travailleur dans le nord (Thatcher , Reagan) et du Sud (doctrines de choc et dictature) au Chili.

ALIMENTATION

	Reproduction est autonome de la circulation du capital 1450-1750	*L'environnement est considéré comme exogène 1800-2000*	*L'environnement est internalisé et financiarisé 1971-présent*
Alimentation	Le Nouveau Monde est alors devenu, à tous points de vue, un terrain propice au développement du capitalisme industriel. On le voit naitre avec les plantations de sucre. En Picardie médiévale dans le nord- France, il a fallu 200 ans pour effacer 12000 hectares de forêt dans le 12e et 13e siècle . Quatre siècles plus tard , dans le nord-est du Brésil à la hauteur de la canne de sucre dans les 1650. 12000 hectares de forêt seraient effacés en un an. La progression de la frontière du sucre à travers de l'Atlantique , laissant une traînée de forêts défrichées et des fosses communes dans ça marque (1450-1800). La révolution agricole des Pays-Bas (1400-1600), de l' Angleterre (1500-1700). La crise *Peat Dog* a permis aux trois quarts de la main-d'œuvre à travailler en dehors de l'agriculture. La conversion de l' étendue de la Baltique . Du sud de la Norvège à la Russie - comme une zone d'alimentation pour le bois , les produits et les céréales forestières.	Nouvelle révolution de l'agriculture aux États-Unis en l'agro-industrialisation du Midwest .	Prix de nourriture a chuté 39 %.

ÉNERGIE ET MATIÈRE PREMIÈRE

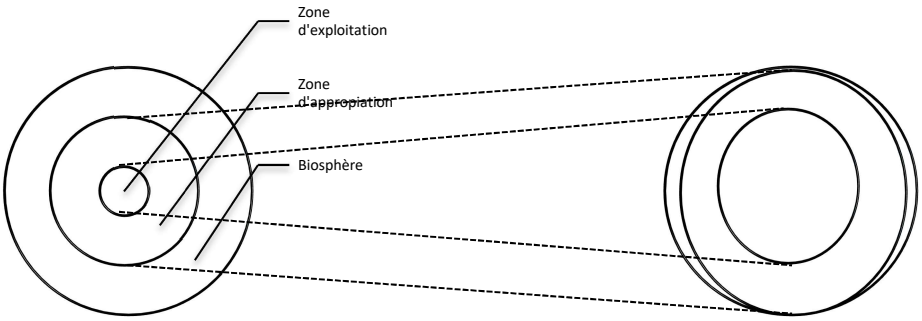
	Reproduction est autonome de la circulation du capital 1450-1750	*L'environnement est considéré comme exogène 1800-2000*	*L'environnement est internalisé et financiarisé 1971-présent*
Énergie	L'Europe du Nord , et l'Angleterre produisent argent, le fer , le cuivre , le plomb , le charbon. La montée de l'argent à Potosi en 1545 et sa restriction et l'épuisement après 1571.	Nouvelle extrativisme de l'énergie comme le charbon ainsi que du charbon de bois (UK , Suède , États-Unis).	Comme la nature au début pas chère devient plus coûteuse , la financiarisation apparaît pour aide le nouvel impérialisme. Le Pétrole stabilisé entre 1983-2003 , à un prix par baril environ deux fois celle de l'après-guerre .
Matière première	L'échelle et la vitesse des changements environnementaux après 1450 ont dépassé les transformations de l'environnement de l'Europe médiévale . Le Nouveau Monde est alors devenu un terrain propice au développement du capitalisme industriel avec l'exploitation minière de l'argent. Cela a détruit les sols et les zones montagneuses des Andes par exemple, qui étaient dépourvus d'arbres, entrainant par là une terrible érosion du sol. Nous voyons considérablement accélérés les cycles d'appropriation de la forêt(le produit forestier) dans le Baltique. On s'est approprié sans distinction en utilisant les Africains pour le travail du sol et de forêt.	Nouvelle extractivisme des matières premières : le coton dans l'Amérique du Sud.	Prix des matières premières comme les métaux ont chuté de près de la moitié entre 1975-1989.

VII.A : Wold-systems theorie: Le concept du système monde développé par Braudel et Wallerstein

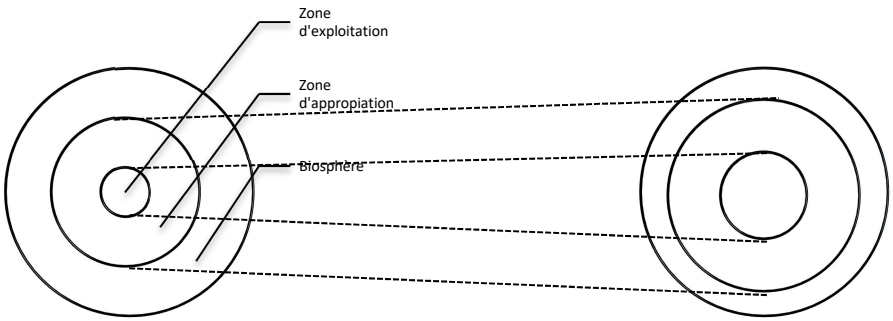
À l'intérieur du centre de notre système, le capitalisme considère le travail humain comme un bien ou ressource à l'intérieur du système marchand ou système de valeur en échange dans la zone d'exploitation. Dans la conception marxiste, le travailleur travaille quatre heures pour toucher son propre salaire comme rémunération des facteurs de production et quatre heures supplémentaires pour le capitaliste.

À l'intérieur du centre de notre système, le capitalisme considère le travail humain comme un bien ou ressource à l'intérieur du système marchand ou système de valeur en échange dans la zone d'exploitation. Dans la conception marxiste, le travailleur travaille quatre heures pour toucher son propre salaire comme rémunération des facteurs de production et quatre heures supplémentaires pour le capitaliste.

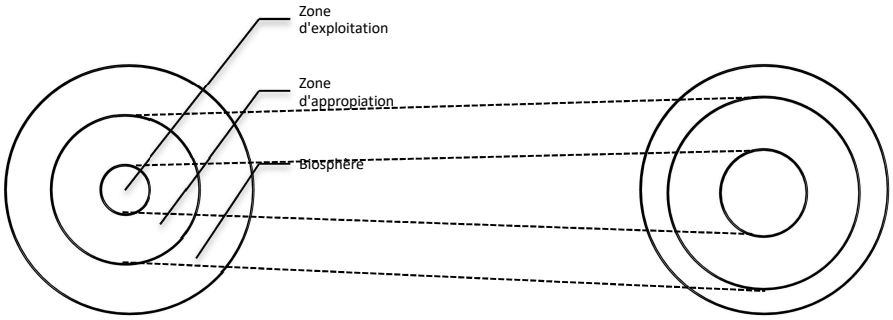
A : Scénario de référence *business-as-usual (BAU)* sans bouclage de flux :



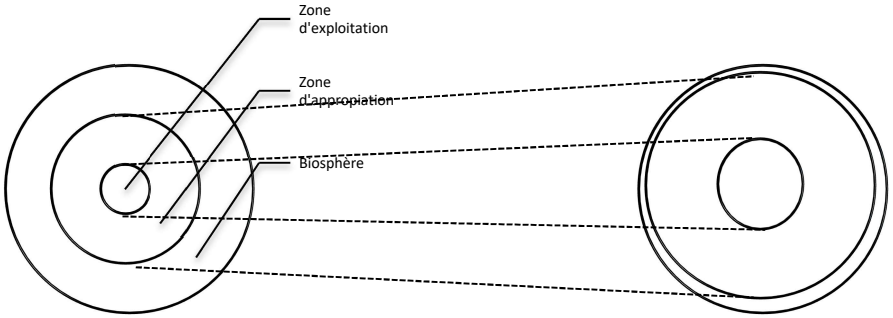
B : Scénario de bouclage de flux de matière. Nous distinguerons quelques formes de prise en compte de l'élimination et valorisation des déchets dans le cadre de la production jointe.



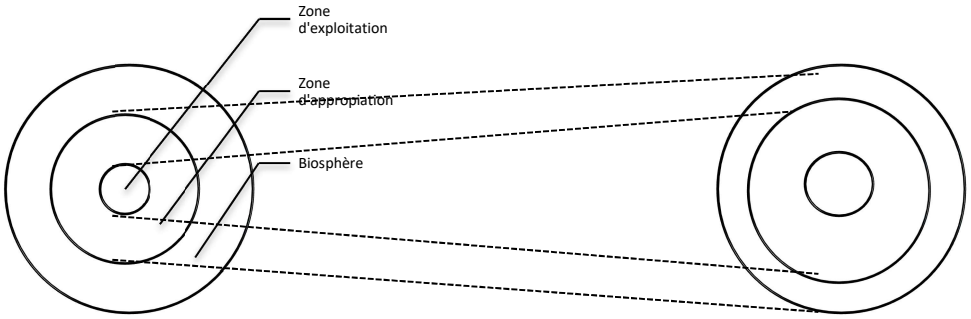
Scénario de bouclage de flux de matière: Première case spéciale. Nous supposons la représentation des certains flux de la biosphère à travers du processus 5 (Hydrosphère), 6 (Atmosphère). Donc, les processus écologiques d'eutrophisation de l'azote dans l'hydrosphère et un processus écologique comme la pluie acide qui utilise l'atmosphère



Scénario de bouclage de flux de matière: Deuxième case spéciale. Cette case spéciale va à servir pour tester notre proposition du chapitre 5 sur les *relations fondamentalement asymétriques* entre la biosphère et l'économie à travers d'un processus économique qui produit un **service de traitement de l'eau et** un processus économique **d'incinération de déchet et de filtrage de gaz.**



C : Scénario de bouclage des flux de matière et d'énergie. Case de traitement de déchet et bouclage de flux de matière et d'énergie à travers d'un processus économique comme la **valorisation des déchets.**



VIII.A : *Toolbox - Matlab Integrated Development Environment (IDE)*

MathWorks propose une boîte à outils ou *System Toolbox*, qui permet de réaliser la simulation, la programmation linéaire ou quadratique, l'optimisation non-linéaire et la résolution par moindres carrés non-linéaires. Un des outils utiisé par le *System Toolbox* est le *Integrated Development Environment (IDE).* Il comporte un éditeur de texte destiné à la programmation et des fonctions qui permettent de démarrer un *script* ou *code* déjà fait au logiciel Matlab.

Vous trouverons ci-dessous le *Toolbox* Matlab qui a été développé par Robbie Andrew en 2011 à qui nous avons adapté pour trouver les solution de notre système de la valeur.

Nous avons utilisé la version 7.12.0 (R2011a) de Matlab.

```
% general_solve.m -- TOP LEVEL FUNCTION
%
% Provides a set of systems and a set of solution methods for ecological
% pricing exploration.
%
% Robbie Andrew 2011
%
%
% To operate:
%  Enter system details into the file 'Ecoprice Solver Index.xlsx'
%  Load this file into Matlab
%  Click the Run button (green triangle), or press F5
%  Select from the menu options
%  Choose a commodity to which prices should be normalised

clear

% Read in system index
fname_index = 'Ecoprice Solver Index.xlsx' ;
[a,system_index] = xlsread(fname_index, 'index','A2:I10000') ;
system_list = system_index(:,1) ;

% Present menu of choices
choice = menu('Choose a system', system_list) ;
if (choice == 0), disp('No system chosen'); return; end
Q = system_index(choice,:) ;

system_choice = system_list{choice} ;
drawnow % make sure menu closes before continuing


% Present menu of solvers
solver_list = {'Reflexive'; 'Wake Unconstrained'; 'Wake Constrained'; 'Sraffa'} ;
choice = menu('Choose a solver', solver_list) ;
if (choice ==0), disp('No solver chosen'); return; end
```

```
drawnow % make sure menu closes before continuing

% Load chosen system
disp('Loading data...')
inputs  = xlsread(Q{2},Q{3},Q{4}) ;
outputs = xlsread(Q{2},Q{5},Q{6}) ;
if ~isempty(Q{7})
    p0      = xlsread(Q{7},Q{8},Q{9}) ; end

if any(size(inputs)~=size(outputs))
    error('Inputs and outputs matrices are not the same size') ; end
 if(any(any(isnan(inputs))))
    error('Inputs matrix contains at least one non-number: check Excel worksheet') ; end
if(any(any(isnan(outputs))))
    error('Outputs matrix contains at least one non-number: check Excel worksheet') ; end



beep;beep
normalise_to = input(['Enter commodity to which prices should be normalised (max '
num2str(size(inputs,2)) '): ']) ;
if (normalise_to > size(inputs,2) || normalise_to < 1)
    error('Invalid process number entered') ; end

disp(['Applying ' solver_list{choice} ' Method to: ' system_choice])

switch choice
    case 1 % Reflexive
        if ~exist('p0','var')
            error('Error: Reflexive method requires initial prices') ; end
        reflexive_method_fn(-inputs, outputs, p0, normalise_to, system_choice) ;
    case 2 % Wake Unconstrained
        if exist('p0','var')
            disp('Initial prices will be ignored') ; end
        wake_unconstrained_fn(inputs, outputs, normalise_to, system_choice) ;
    case 3 % Wake Constrained
        if exist('p0','var')
            disp('Initial prices will be ignored') ; end
        wake_constrained_fn(inputs, outputs, normalise_to, system_choice) ;
    case 4 % Eigensolution
        if size(inputs,1)~=size(inputs,2)
            error('System must be square for Sraffa method') ; end
        if exist('p0','var')
            disp('Initial prices will be ignored') ; end
        sraffa_fn(inputs, outputs, normalise_to, system_choice) ;
    otherwise
        disp('Unknown method') ;
        end
```

VIII.B : Code Matlab des flux et des cascades

A continuation le code Matlab va permettre de montrer le calcul des vecteurs et des valeurs propres des flux circulaires et des cascades.

1. Flux circulaire de type I :

>> % ** Calcule de la valeur propre et le vecteur propre. La matrice 3x3 avec surplus **
>> A = [240 12 18;90 6 12;120 3 30]

A =

$$\begin{bmatrix} 240 & 12 & 18 \\ 90 & 6 & 12 \\ 120 & 3 & 30 \end{bmatrix}$$

>> B = [450 0 0;0 21 0;0 0 60]

B =

$$\begin{bmatrix} 450 & 0 & 0 \\ 0 & 21 & 0 \\ 0 & 0 & 60 \end{bmatrix}$$

>> C=inv(B)

C =

$$\begin{bmatrix} 0.0022 & 0 & 0 \\ 0 & 0.0476 & 0 \\ 0 & 0 & 0.0167 \end{bmatrix}$$

>> Q=C*A

Q =

$$\begin{bmatrix} 0.5333 & 0.0267 & 0.0400 \\ 4.2857 & 0.2857 & 0.5714 \\ 2.0000 & 0.0500 & 0.5000 \end{bmatrix}$$

>> [U,V]=eig(Q)

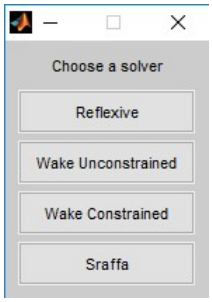
U =

$$\begin{bmatrix} -0.0891 \\ -0.8909 \\ -0.4454 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -0.0821 \\ 0.9563 \\ 0.2807 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -0.1322 \\ -0.0000 \\ 0.9912 \end{bmatrix}$$

V =

$$\begin{bmatrix} 1.0000 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0.0857 \\ 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0.2333 \end{bmatrix}$$

Les prix relatifs peuvent aussi être calculés en utilisant l'outil de *Matlab Integrated Development Environment*. Nous avons sélectionné la méthode *Sraffa* dans le tableau ci-dessous.



Loading data...
Enter commodity to which prices should be normalised (max 3): 1
Applying Sraffa Method to: Peanuts and Oranges
Initial prices will be ignored
Prices

$$\begin{bmatrix} 1.0000 \\ 10.0000 \\ 5.0000 \end{bmatrix}$$

2.Flux circulaire de type II: Système de 3 processus et de 3 transferts en utilisant la production conjointe pour calculer les prix relatifs et le surplus.

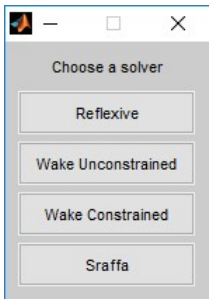
Les prix relatifs ont été calculés en utilisant l'outil de *Matlab Integrated Development Environment*. Nous avons sélectionné la méthode *Sraffa*.

Loading data...
Enter commodity to which prices should be normalised (max 3): 1
Applying Sraffa Method to: Peanuts and Oranges
Initial prices will be ignored
Maximum profit: 0.94564
Prices

$$\begin{bmatrix} 1.0000 \\ 7.4719 \\ 5.3263 \end{bmatrix}$$

3.Flux circulaire de type III : Système de 2 processus et de 2 transferts en utilisant les méthodes réflexives pour calculer les prix relatifs des intrants et le surplus.

Les prix relatifs ont été calculés en utilisant l'outil de *Matlab Integrated Development Environment*. Nous avons sélectionné *Reflexive Method* dans le tableau ci-dessous.



Loading data...
Enter commodity to which prices should be normalised (max 3): 1
Applying Reflexive Method to: Peanuts and Oranges
Tolerance is: 0.005
Max iterations is: 10000
Iteration: 10
Iteration: 20

System efficiency:
1.0033

price

$$\begin{bmatrix} 1.0000 \\ 21.9138 \\ 5.9015 \end{bmatrix}$$

efficiency
1.0028
1.0040
Price iterations are in 'store' array.
20 iterations were completed.
>>

4. Flux circulaire de type IV : Système de 2 processus et de 2 transferts en utilisant réflexives méthodes pour calculer les prix relatifs des intrants, des déchets et le surplus:

Les prix relatifs ont été calculés en utilisant l'outil de *Matlab Integrated Development Environment*. Nous avons sélectionné *Reflexive Method*.

Loading data...
Enter commodity to which prices should be normalised (max 4): 1
Applying Reflexive Method to: Peanuts and Oranges
Tolerance is: 0.005
Max iterations is: 10000

System efficiency:
1.0025

price
$\begin{bmatrix} 1.0000 \\ 0.3186 \\ 0.4533 \\ 2.9518 \end{bmatrix}$
efficiency
1.0038
0.9966
Price iterations are in 'store' array.
9 iterations were completed.
>>

5. Cascade de type I : Cascade simple sans production conjointe, système de 2 processus et 1 transfert sans production conjointe en utilisant les méthodes réflexives pour calculer les prix relatifs des intrants et surplus.

Les prix relatifs ont été calculés en utilisant l'outil de *Matlab Integrated Development Environment*. Nous avons sélectionné *Reflexive Method*.

Loading data...
Enter commodity to which prices should be normalised (max 3): 1
Applying Reflexive Method to: Peanuts and Oranges
Tolerance is: 0.005
Max iterations is: 10000
System efficiency:
1

price
$\begin{bmatrix} 1.0000 \\ 0.6667 \\ 0.4444 \end{bmatrix}$
efficiency
1.0000
1.0000
Price iterations are in 'store' array.

2 iterations were completed.

6.Cascade de type II : Cascade simple sans production conjointe ; 3 processus et 2 transferts sans production en utilisant les méthodes réflexives pour calculer les prix relatives des intrants, déchets et surplus.

Les prix relatifs ont été calculés en utilisant l'outil de *Matlab Integrated Development Environment*. Nous avons sélectionné *Reflexive Method*.

Loading data...
Enter commodity to which prices should be normalised (max 5): 1
Applying Reflexive Method to: Peanuts and Oranges
Tolerance is: 0.005
Max iterations is: 10000

System efficiency:
0.9995

price
[1.0000
0.8824
1.1025
0.8824
8.4659]
efficiency
1.0000
0.9978
0.9996
Price iterations are in 'store' array.
6 iterations were completed.
>>

7.Cascade de type III : Cascade simple avec production conjointe Système de 3 processus et de 2 transferts.

Les prix relatifs ont été calculés en utilisant l'outil de *Matlab Integrated Development Environment*. Nous avons sélectionné la méthode *Sraffa*.

Loading data...
Enter commodity to which prices should be normalised (max 3): 1
Applying Sraffa Method to: Peanuts and Oranges
Initial prices will be ignored
Maximum profit: 1.5
Prices
[1. 0000
-2.7500
5.0000]

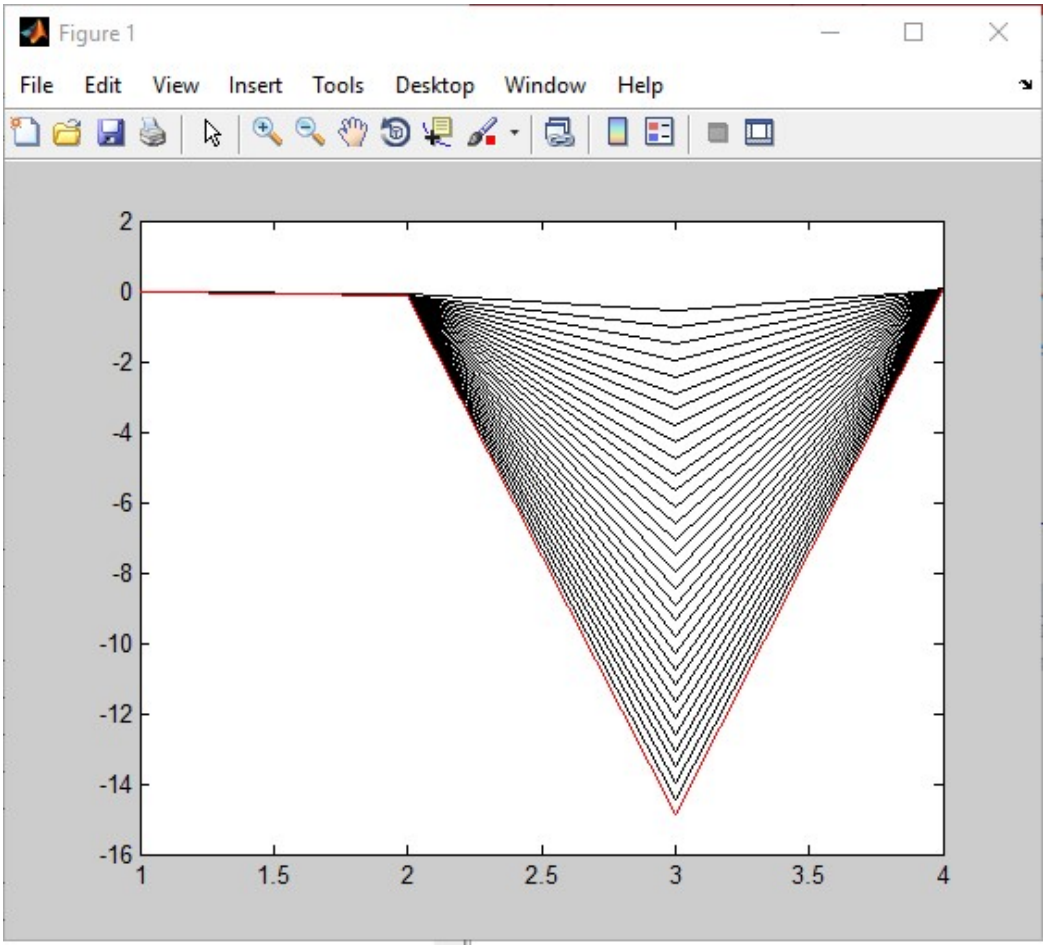
8.Cascade de type IV : Système de 3 processus et de 3 transferts avec réversion de l'entropie (néguentropie) en utilisant les méthodes réflexives pour calculer les prix relatifs des intrants, des déchets et le surplus.

Les prix relatifs ont été calculés en utilisant l'outil de *Matlab Integrated Development Environment*. Nous avons sélectionné la méthode *Reflexive Method*.

Loading data...
Enter commodity to which prices should be normalised (max 4): 1
Applying Reflexive Method to: Peanuts and Oranges
Tolerance is: 0.005
Max iterations is: 10000
Iteration: 10
Iteration: 20
Iteration: 30
Iteration: 40
Iteration: 50

Iteration: 60
Iteration: 70
Iteration: 80
Iteration: 90
Iteration: 100
Iteration: 110
Iteration: 120
Iteration: 130
Iteration: 140
Iteration: 150
Iteration: 160
Iteration: 170
Iteration: 180
Iteration: 190
Iteration: 200
Iteration: 210
Iteration: 220
Iteration: 230
Iteration: 240
Iteration: 250
Iteration: 260
Iteration: 270
Iteration: 280
Iteration: 290
Iteration: 300
Iteration: 310
Iteration: 320

Ensuite la prochaine figure montre pour itération une forte variation des prix relatifs de la ressource 3 vers des valeurs négatives (l'axe x présente la variation de prix en log et l'axe y présente les vecteurs de prix des 4 ressources).



System efficiency:
0.6197

price
$\begin{bmatrix} 1.0000 \\ 0.7214 \\ 0.0000 \\ 1.2010 \end{bmatrix}$
efficiency
0.5809
0.6977
0.5667
Price iterations are in 'store' array.
324 iterations were completed.

9.Cascade de type V : Système de 3 processus et de 3 transferts avec réversion de l'entropie (néguentropie), mais sans la production des polluants en utilisant Matlab.

Les prix relatifs ont été calculés en utilisant l'outil *Matlab Integrated Development Environment (IDE).* Nous avons sélectionné la méthode *Sraffa* (cf. Flux circulaire de type II).

Loading data...
Enter commodity to which prices should be normalised (max 3): 1
Applying Sraffa Method to: Peanuts and Oranges
Initial prices will be ignored
Maximum profit: 0.92281
Prices

$$\begin{bmatrix} 1.0000 \\ -0.0772 \\ 0.9466 \end{bmatrix}$$

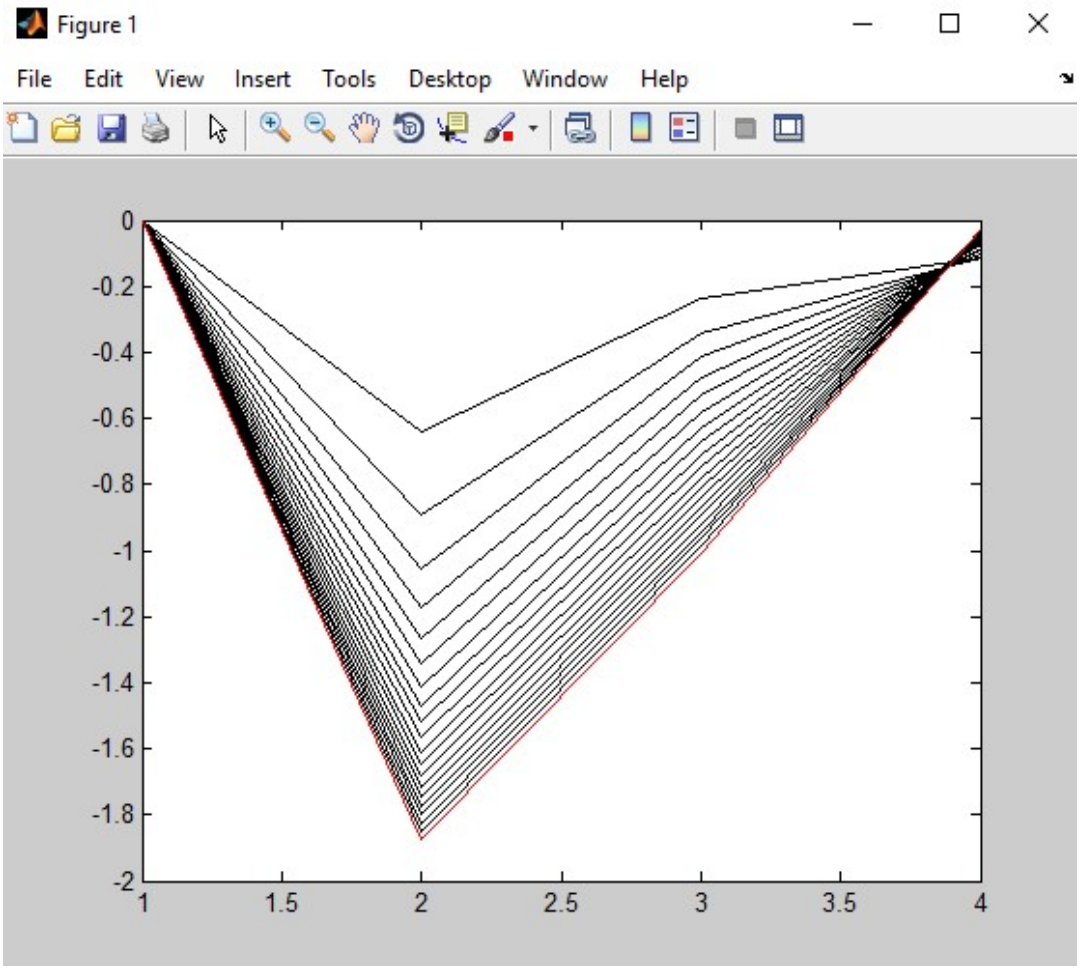
10.Cascade de type VI : Système de 3 processus et de 4 transferts (matière+énergie) avec réversion de l'entropie (néguentropie) en utilisant les méthodes réflexives pour calculer les prix relatifs des intrants et le surplus.

Les prix relatifs ont été calculés en utilisant l'outil de *Matlab Integrated Development Environment.* Nous avons sélectionné la méthode *Reflexive Method.*

Loading data...
Enter commodity to which prices should be normalised (max 4): 1
Applying Reflexive Method to: Peanuts and Oranges
Tolerance is: 0.005
Max iterations is: 10000
Iteration: 10
Iteration: 20
Iteration: 30
Iteration: 40
Iteration: 50
Iteration: 60
Iteration: 70
Iteration: 80
Iteration: 90
Iteration: 100
Iteration: 110
Iteration: 120
Iteration: 130
Iteration: 140
Iteration: 150
Iteration: 160
Iteration: 170
Iteration: 180
Iteration: 190
Iteration: 200

Graphiquement, la figure ci-dessous montre pour itération une forte variation des prix relatifs vers des valeurs négatives (l'axe x présente la variation de prix en log et l'axe y présente les vecteurs de prix des 4 ressources).

.



System efficiency:

0.9797

price

$$\begin{bmatrix} 1.0000 \\ 0.0131 \\ 0.0966 \\ 0.9396 \end{bmatrix}$$

efficiency

0.9870

0.9761

0.9764

Price iterations are in 'store' array.

204 iterations were completed.

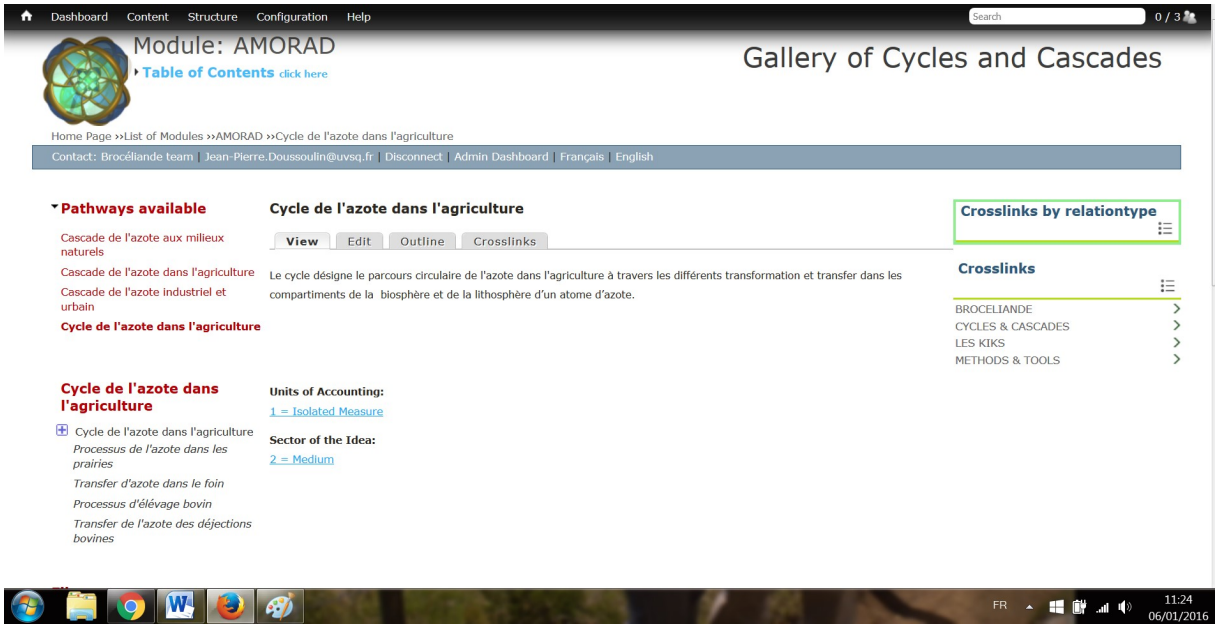
>>

VIII.C : Structure des cycles et cascades en ePLANETe.

Cycle de l'azote dans l'agriculture :

La figure ci-dessous montre à gauche une liste de processus et transfert du cycle de l'azote dans l'agriculture. La figure dans la colonne du centre exprime une définition générale du cycle. La figure dans la colonne à la droite exprime le lien croisé (crosslinks) avec la galerie des indicateurs ou KIKs.

Figure VIII.C.I : Cycle de l'azote dans l'agriculture en utilisant ePLANETe



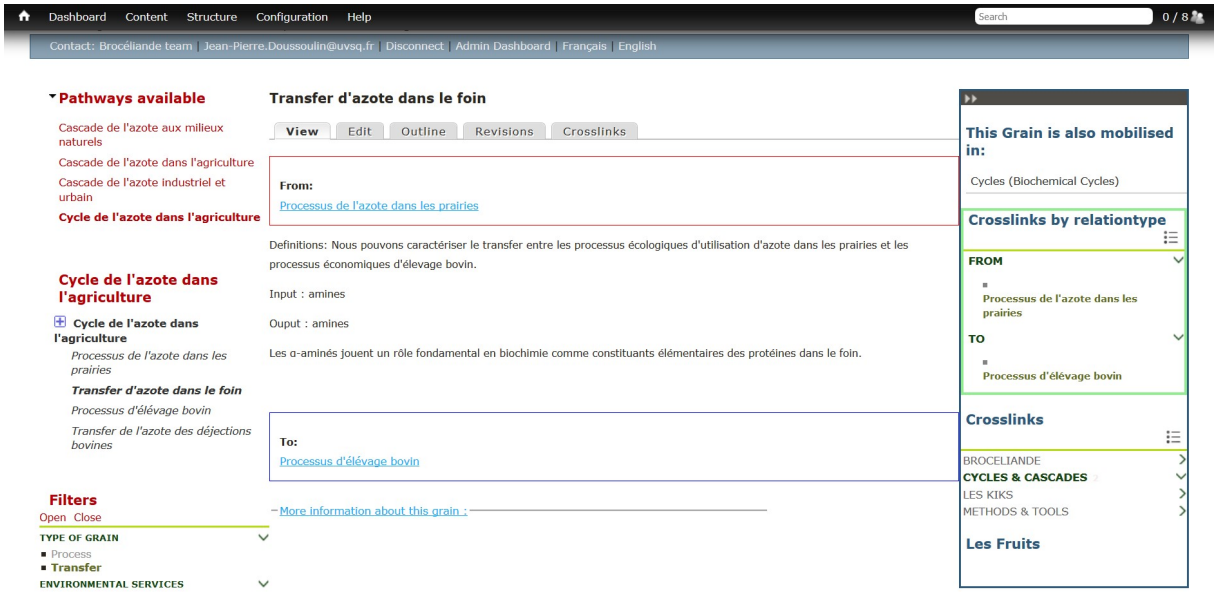
Source: *https://proxy.eplanete.net/galleries/cc/node/2268/2311/grain* (site consulté le 15 juin 2015).

Les figures ci-dessous montrent des détails de la structure des processus et des transferts du cycle de l'azote dans l'agriculture.

Figure VIII.C.II: Processus1 de l'azote dans les prairies en utilisant ePLANETe

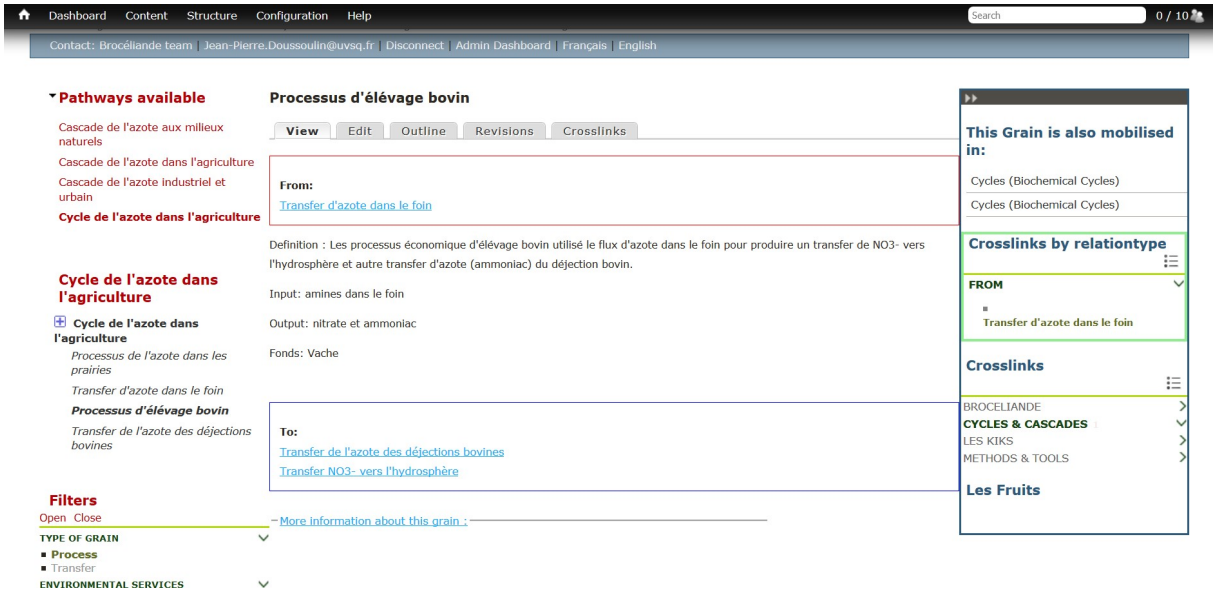
Source : L'auteur en *https://proxy.eplanete.net/galleries/cc/node/2268/2311/grain* (site consulté le 15 juin 2015).

Figure VIII.C.III :Transferts 1-2 dans le foin en utilisant ePLANETe



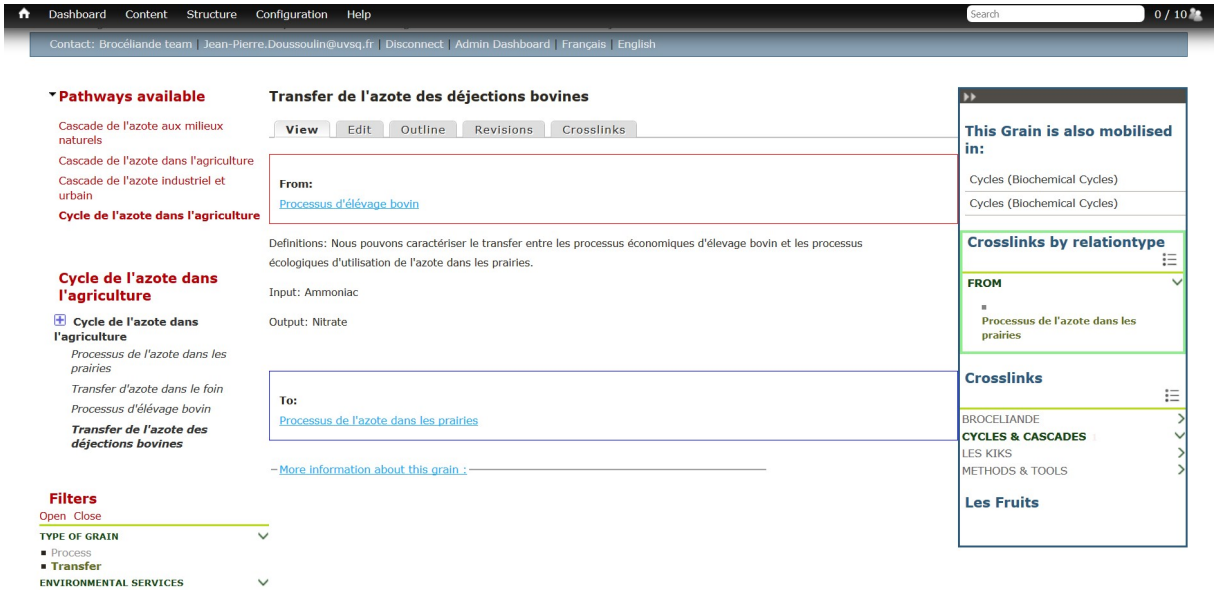
Source : L'auteur en *https://proxy.eplanete.net/galleries/cc/node/2268/2311/grain* (site consulté le 15 juin 2015).

Figure VIII.C.IV : Processus 2 d'élévage de bovin en utilisant ePLANETe



Source : L'auteur en *https://proxy.eplanete.net/galleries/cc/node/2268/2311/grain* (site consulté le 15 juin 2015).

Figure VIII.C.V : Transferts 2-1 de l'azote des déjections bovines en utilisant ePLANETe

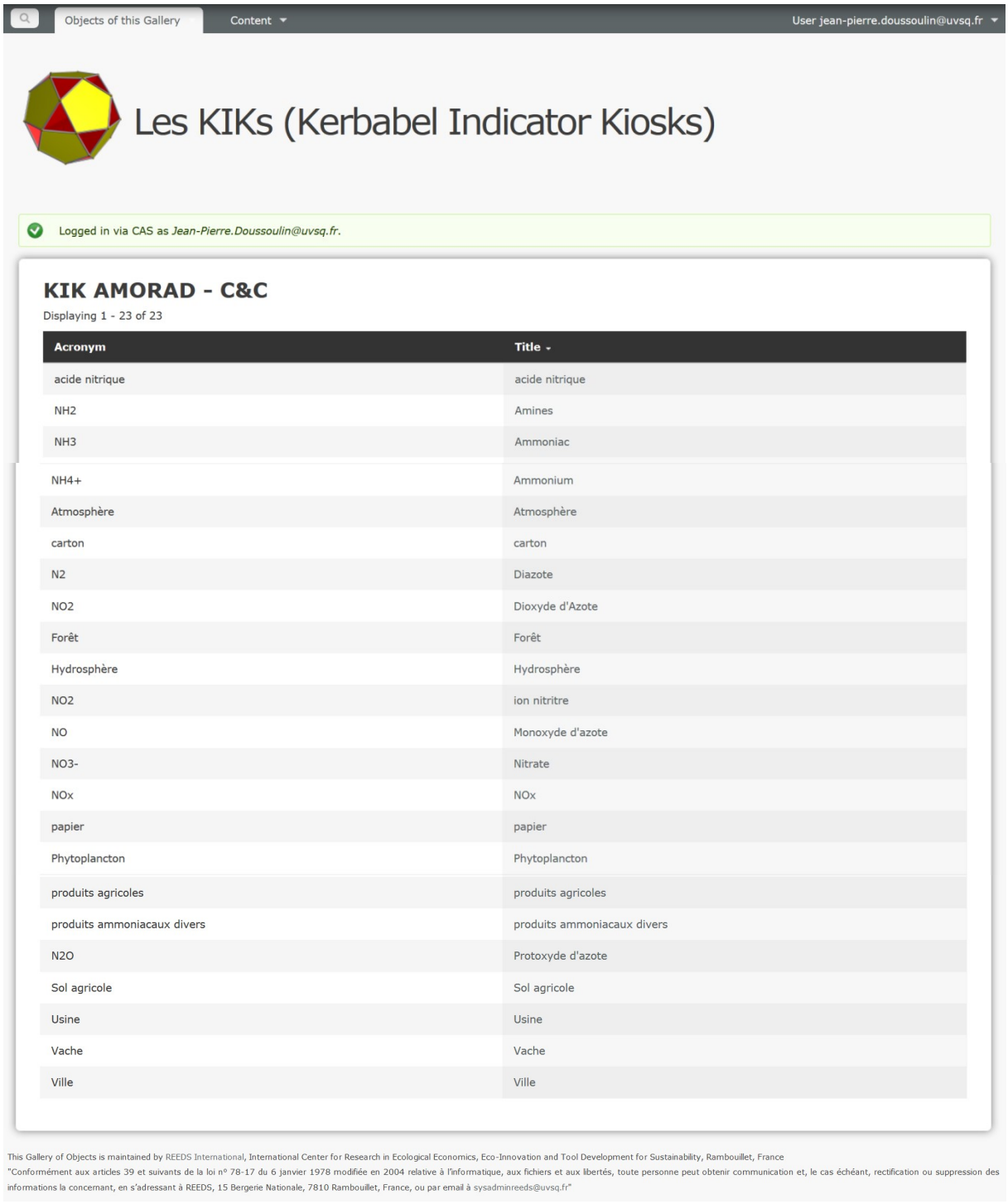


Source : L'auteur en *https://proxy.eplanete.net/galleries/cc/node/2268/2311/grain* (site consulté le 15 juin 2015).

Les KIKs (Kerbabel Indicators Kiosks):

La galerie des indicateurs KIK permet de structure une liste des acronymes qui peuvent définir des indicateurs comme des inputs, des outputs ou de fond de notre structure d'analyse.

Figure VIII.C.VI : Les indicators KIKs



Source: *https://proxy.eplanete.net/galleries/indicators/amorad-cc-all* (site consulté le 15 juin 2015).

IX.A : Les indicateurs du modèle didactique.

Nombre de l'indicateur	*Définition*	*Numéraire*
Regenerative Capacity	A weighted sum of all of the element e and process k ecotime produced by the global environment as a result of biogeochemical processes.	Pg/années
Rp	Use of environmental commodity by economic process	Euro/année ou MTEP
Wh	Supply of residuals by households.	Euro/année ou MTEP
Rh	Use of environmental commodity for households consumption	Euro/année ou MTEP
W	Supply of residuals by economic process	Euro/année ou MTEP
Ecoconsumption	A weighted sum of all of the element e and process k ecotime consumed by the global economy as a result of its resource use and residual/waste generation.	Pg/années
Ecoprice	The total loss of element e and process k ecotime necessary to produce an economic commodity i for consumption.	Pg/années/euro
Ecological Overshoot	Ratio	The ratio of ecoconsumption to regenerative capacity for element e and designated process k.
Q	Euro/année ou MTEP	Net accumulation of environmental stocks
A	Euro/année ou MTEP	Use of environmental commodity by environmental process.
B	Euro/année ou MTEP	Supply by environmental process of environmental commodity
Ecotime	année	The average length of time for matter of element e and held within an ecological commodity i to reach a designated biogeochemical process k.

X.A : Les indicateurs de l'ADEME

Matières mobilisées

Les *matières mobilisées* par l'économie française sont l'ensemble des quantités physiques de matières premières:

Tableau X.A.I: Les indicateurs matières mobilisées de l'ADEME

Nombre de l'indicateur	*Numéraire*
Consommation intérieure apparente de matières en 2011	Mt
Consommation intérieure apparente de matières de 1990 à 2011	Mt
Évolution de la part des ressources renouvelables et épuisables dans les matières extraites en France entre 1990 et 2011	Mt
Consommation intérieure apparente de matières en 2011	Mt
Consommation intérieure apparente de matières de 1990 à 2011	Mt
Évolution de la part des ressources renouvelables et épuisables dans les matières extraites en France entre 1990 et 2011	Mt
Évolution de la part des ressources renouvelables et épuisables dans les matières importées entre 1990 et 2011	Mt

Source : L'auteur à partir de l'ADEME, 2014

Production des déchets

Tableau X.A.II : Les indicateurs de la production des déchets de l'ADEME

Nombre de l'indicateur	*Numéraire*
La production du déchets en France en 2010	Mt
Évolution de la production du déchets en France de 2004 à 2010	Mt
Évolution de la production du déchets dangereux et non dangereux par habitant de 2004 à 2010	Mt
Production des déchets organiques hors déchets de l'agriculture et de la pêche en 2010	Mt
Évolution de la quantité d'ordures ménagères par habitant entre 1960 et 2010	Mt
Évolution de la quantité du déchets ménagers par habitant entre 2004 et 2010	Mt
Évolution des quantités du déchets ménagers par million d'euros de biens consommés	Mt
Composition de l'ensemble des ordures ménagères résiduelles et collectes séparées en 2007	Mt
Déchets municipaux produits en Europe en 2011	Mt
Production du déchets des activités économiques en 2010	Mt
Production du déchets des activités économiques par secteur d'activité et dangerosité en 2010	Mt
Production du déchets des activités économiques par secteur d'activité de 2004 à 2010	Mt
Évolution du tonnage du déchets générés par les activités économiques d'un secteur pour une valeur ajoutée d'un million d'euros de 2004 à 2010	Mt

Source : L'auteur à partir de l'ADEME, 2014

Gisements du déchet par les principales filières REP

Tableau X.A.III : Les indicateurs de gisements du déchets pour les principales filières REP de l'ADEME

Nombre de l'indicateur	*Numéraire*
Gisement du déchets des principales filières REP	Tonnes

Source : L'auteur à partir de l'ADEME, 2014

Prévention des déchets

La *prévention* de la production du déchets consiste à réduire la quantité et la nocivité des déchets produits.

Tableau X.A.IV : Les indicateurs de la prévention des déchets de l'ADEME

Nombre de l'indicateur	*Numéraire*
Part de la population couverte par les programmes locaux de prévention déchets	%
Évolution du nombre d'habitants concernés par la tarification incitative, depuis les études préalables jusqu'à la mise en œuvre	nombre de collectivités et population
Impact de l'instauration de la redevance incitative (RI) sur les quantités collectées par habitant, en milieu rural ou mixte	kg/habitant
Nombre d'EPCI ayant distribué des composteurs individuels selon l'année de mise en place	Habitant
Biens arrivant en fin de vie en 2008	Mt
Réemploi dans l'économie sociale solidaire (ESS) et les filières de l'occasion	Quantités réemployées et réutilisées
Taux de réutilisation des pièces de VHU en Europe en 2011	%

Source : L'auteur à partir de l'ADEME, 2014

Collecte des déchets des ménagers

Tableau X.A.V : Les indicateur la collecte des déchets des ménagers de l'ADEME

Nombre de l'indicateur	*Numéraire*
Répartition des structures de collecte des déchets ménagers et assimilés par nature juridique en 2011	Nombre commun
Répartition du tonnage du déchets ménagers et assimilés collectés par typologie d'habitat	Mt
Évolution du nombre de déchèteries de 1990 à 2013	Nombre de déchèteries
Évolution des déchets collectés par flux de collecte depuis 2005	Mt
Évolution des déchets ménagers et assimilés collectés	kg/habitant
Évolution des déchets collectés en flux sélectif ou en déchèterie par types de matériaux depuis 2005	Mt
Destination des déchets ménagers et assimilés collectés	Mt

Source : L'auteur à partir de l'ADEME, 2014

Collecte des déchets des entreprises

Tableau X.A.VI : Les indicateur la collecte des déchets des entreprises de l'ADEME

Nombre de l'indicateur	*Numéraire*
Mode de collecte des déchets de l'industrie en % des tonnes produites en 2008	%
Destination des déchets de l'industrie en 2008	Mt

Source : L'auteur à partir de l'ADEME, 2014

Échanges transfrontaliers du déchets

Tableau X.A.VII : Les indicateurs d'échanges transfrontaliers du déchets de l'ADEME

Nombre de l'indicateur	*Numéraire*
Importations et exportations du déchets non dangereux en 2012	%
Exportations et importations du déchets non dangereux par type du déchets en 2012	Mt
Valeur des exportations et importations du déchets depuis 2003	%

Source : L'auteur à partir de l'ADEME, 2014

Collecte dans les filières REP

Les filières REP fournissent 6,5 millions de tonnes de matériaux recyclables (ADEME, 2014).

Tableau X.A.VIII : Les indicateurs de la collecte dans les filières REP de l'ADEME

Nombre de l'indicateur	*Numéraire*
Quantités du déchets collectées dans les filières REP	Tonnes

Source : L'auteur à partir de l'ADEME, 2014

Traitement des déchets non dangereux dans les ITOM

Tableau X.A.IX : Les indicateur de Traitement des déchets non dangereux dans les ITOM de l'ADEME

Nombre de l'indicateur	*Numéraire*
Évolution des installations de traitement des déchets ménagers et assimilés	Nombre d'unités de traitement
Bilan des tonnages entrant dans les installations de traitement des ordures ménagères	Kt
Évolution des tonnages traités hors refus de traitement selon la nature du traitement	%

Source : L'auteur à partir de l'ADEME, 2014

Traitement des minéraux non dangereux et non dangereux

Tableau X.A.X : Les indicateurs traitement des minéraux non dangereux et non dangereux de l'ADEME

Nombre de l'indicateur	*Numéraire*
Évolution du mode de traitement des déchets dangereux de 2004 à 2010	Mt
Destination des déchets minéraux non dangereux en 2010	Mt

Source : L'auteur à partir de l'ADEME, 2014

Tri et recyclage

Tableau X.A.XI : Les indicateur du Tri et recyclage des déchets de l'ADEME

Nombre de l'indicateur	*Numéraire*
Évolution du parc de centres de tri accueillant les déchets ménagers et assimilés	Nombre de centres de tri
Évolution des quantités du déchets reçus en centres accueillant les DMA et envoyés en recyclage après tri	Mt
Recyclage dans les filières REP en 2012	%
Taux de recyclage des emballages par matériau (% de matériaux envoyés en recyclage par rapport au gisement)	Taux de recyclage en %
Utilisation des matières recyclées dans l'industrie française en 2010	Mt
Déchets municipaux envoyés en recyclage en 2011	kg/hab.

Source : L'auteur à partir de l'ADEME, 2014

Compostage

Tableau X.A.XII : Les indicateurs de compostage des déchets des ménagers de l'ADEME

Nombre de l'indicateur	*Numéraire*
Évolution du nombre de centres de compostage	Nombre de centres
Évolution des tonnages envoyés en compostage et du compost produit	Mt
Déchets municipaux compostés et méthanisés en 2011 selon les pays européens, en kg par habitant	kg par habitant

Source : L'auteur à partir de l'ADEME, 2014

Méthanisation des DMA

Tableau X.A.XIII : Les indicateurs de méthanisation des DMA de l'ADEME

Nombre de l'indicateur	*Numéraire*
Ouvertures/fermetures et nombre de centres de méthanisation des déchets ménagers et assimilés	Nombre de centres

Source : L'auteur à partir de l'ADEME, 2014

Énergie produite selon la nature du traitement

Tableau X.A.XIV : Les indicateurs de l' énergie produite selon la nature du traitement de l'ADEME

Nombre de l'indicateur	*Numéraire*
Production énergétique des UIOM et des ISDND en 2010	GWh
Production énergétique des installations de méthanisation en 2010	GWh
Évolution de la production d'énergie électrique par mode de traitement (hors biomasse)	GWh
Évolution de la production d'énergie thermique par mode de traitement (hors biomasse)	GWh

Source : L'auteur à partir de l'ADEME, 2014

Les UIOM (usine d'incinération des ordures ménagères)

Tableau X.A.XV : Les indicateurs des UIOM de l'ADEME

Nombre de l'indicateur	*Numéraire*
Parc français des UIOM avec production énergétique en 2010	Nombre de Structures
Déchets incinérés dans une UIOM avec production d'énergie en 2010	Tonnes
Évolution des tonnages incinérés avec production énergétique	Mt
Production énergétique des UIOM en 2010, y compris autoconsommation	GWh
Production énergétique vendue des UIOM en 2010, par tonne incinérée	kWh/tonne
Taux de valorisation énergétique des déchets municipaux des pays européens	%

Source : L'auteur à partir de l'ADEME, 2014

Parc d'élimination

Tableau X.A.XVI : Les indicateurs de parc d'élimination des déchets des ménagers de l'ADEME

Nombre de l'indicateur	*Numéraire*
Installations de stockage du déchets non dangereux	Nombre d'installations
Parc d'élimination des déchets en 2010	Nombre d'installations
Évolution du parc des ISDND et des capacités de stockage de 2000 à 2012	Mt et Nombre d'unités

Source : L'auteur à partir de l'ADEME, 2014

Tonnages éliminés

Tableau X.A.XVII : Les tonnages éliminés de l'ADEME

Nombre de l'indicateur	*Numéraire*
Évolution du parc des ISDND et des capacités de stockage de 2000 à 2012	Mt

Source : L'auteur à partir de l'ADEME, 2014

Déchets stockés

Tableau X.A.XVIII : Les indicateurs des déchets stockés de l'ADEME

Nombre de l'indicateur	*Numéraire*
Déchets municipaux stockés en Europe en 2011	kg/habitant
Parc d'installations de stockage des pays européens par dangerosité du déchets traités	Nombre d'installations

Source : L'auteur à partir de l'ADEME, 2014

Financement et dépenses liées à la gestion des déchets

Tableau X.A.XIX : Les indicateur du financement et dépenses liées à la gestion des déchets de l'ADEME

Nombre de l'indicateur	*Numéraire*
Dépenses totales de gestion des déchets	Millions d'euros
Évolution des dépenses totales selon le gestionnaire du déchets	Millions d'euros
Évolution des dépenses courantes selon le gestionnaire du déchets	Millions d'euros
Dépenses d'investissements pour la gestion des déchets selon le gestionnaire du déchets	Millions d'euros
Investissements des entreprises non spécialisées pour la gestion interne des déchets	Millions d'euros
Financement de la dépense totale de gestion des déchets de 2000 à 2011	Milliards d'euros
Financement de la gestion des déchets municipaux	Milliards d'euros

Source : L'auteur à partir de l'ADEME, 2014

Coûts de gestion des déchets

Tableau X.A.XX: Les indicateurs des coûts de gestion des déchets de l'ADEME

Nombre de l'indicateur	*Numéraire*
Coûts aidés (HT) de gestion des déchets par type du déchets en euros par habitant	euros par habitant
Coûts aidés (HT) générés par la gestion des déchets par type d'habitat	euros par habitant
Répartition du coût complet (HT) par étape technique en 2010	%
Répartition moyenne des charges, des produits et du financement	€/hab

Source : L'auteur à partir de l'ADEME, 2014

Activités et emplois générés par la gestion des déchets

Tableau X.A.XXI : Les indicateur des activités et emplois générés par la gestion des déchets de l'ADEME

Nombre de l'indicateur	*Numéraire*
Chiffre d'affaires généré par le traitement et la collecte des déchets, la récupération et la dépollution	Milliards d'euros
Chiffre d'affaires généré par les activités de collecte du déchets non dangereux en 2012, selon le mode de collecte	%
Évolution du chiffre d'affaires généré par les activités de collecte du déchets non dangereux selon le mode de collecte	Millions d'euros
Chiffre d'affaires généré par le traitement des déchets, selon le mode de traitement	Millions d'euros
Total des emplois liés à la gestion des déchets, en équivalent temps plein	Nombre d'emplois
Répartition des emplois des entreprises des secteurs d'activité de la collecte, du traitement, de la récupération des déchets et de la dépollution en 2011	%

Source : L'auteur à partir de l'ADEME, 2014

Émissions dans l'air

Tableau X.A.XXII : Les indicateurs d'émissions dans l'air de l'ADEME

Nombre de l'indicateur	*Numéraire*
Émissions brutes de CO2 liées à la gestion des déchets de 1990 à 2011	Milliers de tonnes
Émissions de méthane (CH4) liées à la gestion des déchets de 1990 à 2011	Milliers de tonnes
Émissions de dioxines (PCDD-F) liées à la gestion des déchets de 1990 à 2011	Équivalent toxique international
Récupération du méthane (CH4) des ISDND 72	Millions de m3

Source : L'auteur à partir de l'ADEME, 2014

Impact du recyclage

Tableau X.A.XXIII : Les indicateurs d'impact du recyclage de l'ADEME

Nombre de l'indicateur	*Numéraire*
Impact environnemental du recyclage en 2010	Millions de tonnes, Tonnes-éq-PO4, Millions de m3, Millions de T-éq-CO2, Millions de TEP
Utilisation de matières primaires évitées grâce au recyclage en 2010,selon la nature du matériau	Milliers de tonnes tonnes de ressources primaires non consommées
Émissions de GES évitées grâce au recyclage en 2010 selon la nature du matériau	Millions de tonnes équivalentes C02 non émises

Source : L'auteur à partir de l'ADEME, 2014

X.B : Les indicateurs de la GRI

1. Les matériaux consommés et la part des matériaux recyclés.

Tableau X.B.I : Les indicateurs des matériaux consommés et la part des matériaux recyclés de GRI

Nombre de l'indicateur	*Définition*	*Numéraire*
Materials used by weight or volume	The total weight or volume of non-renewable materials used.	tonnes
Percentage of materials used that are recycled input materials.	The weight or volume of recycled input materials as a percentage of the total input materials used.	tonnes

Source: L'auteur à partir de GRI, 2013

2. La consommation d'énergie.

Tableau X.B.II : Les indicateurs de la consommation d'énergie des matériaux consommés et la part des matériaux recyclés de GRI

Nombre de l'indicateur	*Définition*	*Numéraire*
Direct energy consumption by primary energy source.	Total direct energy consumption in joules, kilowatt hours, or multiples by renewable primary source. Total direct energy consumption in joules, kilowatt hours, or multiples by non-renewable primary source.	kWh
Indirect energy consumption by primary source.	Total amount of indirect energy used by indirect nonrenewable sources and indirect renewable sources in terms of intermediate energy.	kWh
Energy saved due to conservation and efficiency improvements.	Total energy saved by efforts to reduce energy use and increase energy efficiency.	kWh
Initiatives to provide energy-efficient or renewable energy based events, products and services, and reductions in energy requirements as a result of these initiatives.	Existing initiatives to reduce the energy requirements of major events and their products/product groups or services, including initiatives to distribute energy efficient products or services and use renewable energy. Quantified reductions in the energy requirements of events or products and services achieved during the reporting period.	kWh
Initiatives to reduce indirect energy consumption and reductions achieved.	Initiatives to reduce indirect energy use. The extent to which indirect energy use has been reduced during the reporting period for use of energy-intensive materials, subcontracted production, business-related travel and employee commuting.	kWh

Source: L'auteur à partir de GRI, 2013

3. La consommation de l'eau.

Tableau X.B.III : Les indicateurs de la consommation de l'eau de GRI

Nombre de l'indicateur	*Définition*	*Numéraire*
Percentage and total volume of water recycled and reused.	The total volume of water recycled/reused in m3 by the organization per year. The total volume of water recycled/reused by the organization as a percentage of the total water withdrawal.	m^3

Source: L'auteur à partir de GRI, 2013

4. La production du déchet.

Tableau X.B.IV : Les indicateurs de la production du déchet de GRI

Nombre de l'indicateur	*Définition*	*Numéraire*
Initiatives to reduce greenhouse gas emissions and reductions achieved.	Initiatives to reduce greenhouse gas emissions, including the areas where the initiatives were implemented. The extent of greenhouse gas emissions reductions achieved during the reporting period as a direct result of the initiative(s) in tonnes of CO2 equivalent.	tonnes
Total weight of waste by type and disposal method, and initiatives to manage waste and their results.	The total amount of waste (hazardous & non-hazardous) in tonnes by type for reuse. The total amount of waste (hazardous & non-hazardous) in tonnes by type for recycling. the total weight of hazardous and non-hazardous waste, by the following disposal methods: Reuse, Recycling, Composting, Recovery, including energy recovery, Incineration (mass burn), Deep well injection, Landfill, Onsite storage, Other (to be specified by the organization)	tonnes

Source: L'auteur à partir de GRI, 2013

X.C : Les indicateurs d'IRIS

Tableau X.C.I: Les indicateurs financiers favorables à l'investissement social d'IRIS

Nombre de l'indicateur	*Définition*	*Numéraire*
Green Building Practices	Green building practices employed by the company. Choose all that apply: -Building construction and/or operations make use of sustainable materials (e.g. reclaimed products). -Buildings employ energy saving strategies (e.g. energy use monitoring, efficient appliances and lighting, renewable energy use). -Buildings use systems for increasing water efficiency (e.g. water efficient appliances, fixtures, and landscaping). -Buildings use systems to monitor and improve air quality (e.g. increased ventilation, access to natural daylight). -New building sites are chosen based on sustainability considerations (e.g. minimizing impact on ecosystems and waterways).	tonnes
Energy Produced On-site: Renewable	Amount of on-site energy produced and consumed from renewable sources such as solar, wind, geothermal, hydro energy, and biomass during the reporting period.	kWh
Energy Conservation	Energy conservation achieved through reducing the amount of energy needed to carry out the same processes or tasks. This includes energy saved due to process redesign, use of energy-saving equipment, or the elimination of unnecessary energy use. This does not include overall reduction in energy consumption from reduced Organizational activities (e.g. partial outsourcing).	kWh
Water Use: Recycled	Amount of recycled water used for the organization's operations during the reporting period, including uses for productive processes such as packaging, manufacturing, and for human consumption.	litres
Water Conservation	Water reduction achieved through water conservation efforts in operations during the reporting period. Conservation efforts could include low-flow toilets, rainwater collection facilities, etc. Footnote conservation strategies employed and calculation method.	Litres
Waste Disposed:	Amount of waste disposed through reuse and recycling	tonnes

Recycled/Reused	during the reporting period.	
Waste Reductions	Waste reductions achieved during the reporting period through programs for substitution, recycling or recovery. Footnote calculations and assumptions.	tonnes
Recycled Materials	Amount of recycled materials used in products (including packaging) during the reporting period.	tonnes

Source: L'auteur à partir d'IRIS

X.D : Les indicateurs de l'EEA

Dans ce sens, l'UE a proposé des indicateurs pour l'environnement (EEA, 2016). Il fournit une grille de plus de 138 indicateurs en utilisant une typologie de 22 groupes des indicateurs :

Tableau X.D.I: Les indicateurs pour l'environnement proposé pour l'EEA

Typologie d'indicateur	*N° indicateurs*
Agriculture	8
Air pollution	15
Biodiversity	37
Chemicals	4
Climate change	47
Coasts and seas	15
Energy	14
Environment and health	10
Environmental scenarios	2
Fisheries	5
Green economy	3
Household consumption	2
Industry	8
Land use	1
Natural resources	2
Noise	1
Policy instruments	1
Soil	4
Transport	19
Urban environment	1
Waste and material resources	2
Water	19

Source: L'auteur à partir d' EEA, 2006

X.E : Les indicateurs du projet NETGREEN

Les indicateurs

Il propose une grille de 1124 indicateurs et 5 sujets d'évaluation.

Tableau X.E.I: Les indicateurs proposés pour le projet NETGREEN

Nombre sujet d'évaluation	*N° indicateurs*
Aide à la gouvernance	150
Économie durable et résilience	209
Qualité du cadre de vie	253
Justice sociale	256
Soutenabilité de l'environnement	256

Source : L'auteur à partir de Netgreen, 2015

X.F : Les indicateurs de l'EU-EMAS

Tableau X.F.I: Les indicateurs de la performance environnementale proposés pour l' EU-EMAS

Nombre	*Définition*	*Numéraire*
Production output	Production output(PO)	Kg
Raw material consumption	Kg/PO	Kg
Energy consumption	kWh/PO	kWh
Water consumption	m3/PO	m3
Total waste	Kg/PO	Kg
Waste qualities	In % of total waste	Kg
Waste water	m3/PO	m3

Source : L'auteur à partir d'EU-EMAS

X.G : Les indicateurs du SROI

Tableau X.G.I: Les indicateurs des SROI

Nombre de l'indicateur	*Définition*	*Numéraire*
Waste being recycled		Tonnes
Weight of waste going to landfill		Tonnes
Hazardous Waste Avoided	Hazardous waste avoided based on refurbishing /reusing/recycling, during the reporting period	Tonnes
Non-hazardous Waste Avoided.	Solid waste disposal avoided based on refurbishing /reusing/recycling, during the reporting period	Tonnes
Self-report of pro-environmental behaviours	e.g. more recycling, reducing consumption	Tonnes

Source : L'auteur à partir de SROI

XII.A : Code Matlab

```
4% general_solve.m -- TOP LEVEL FUNCTION
%
% Valeur et vecteur propes de processus
économiques.
 % profit     T=B^-1A    Tp=Lambdap
Lambda=1/(1+Pi)
% croissance U=AB^-1    y(t)U=Lambday(t)
 % Jean Pierre Doussoulin 2016
 clc
 disp('Loading data...')
 disp('SCENARIO A (4x4)')
format bank
A=xlsread('Econ.circ.xlsx','BAU','B17:E20')
B=xlsread('Econ.circ.xlsx','BAU','H17:K20')
I=inv(B)*A;
 [price,valeur1]=eig(I);
price
 Pi2=eye(4)/valeur1-eye(4);
 j=A*inv(B);
 [y1,valeur2]=eig(j.');
 y1
 g1=eye(4)/valeur2-eye(4)
 yt1=[0.40 0.71 0.45 0.38]*B*inv(A);
yt2=yt1*B*inv(A);
yt3=yt2*B*inv(A);
yt4=yt3*B*inv(A);
yt5=yt4*B*inv(A);
yt6=yt5*B*inv(A);
yt7=yt6*B*inv(A);
yt1
yt2
yt3
yt4
yt5
yt6
yt7
qt1=[0.40 0.71 0.45 0.38]*B;
qt2=0.89*qt1;
qt3=0.89*qt2;
qt4=0.89*qt3;
qt5=0.89*qt4;
qt6=0.89*qt5;
qt7=0.89*qt6;
qt1
qt2
qt3
qt4
disp('(SCENARIO B(4x4))')
A=xlsread('Econ.circ.xlsx','B','B20:E23')
B=xlsread('Econ.circ.xlsx','B','H20:K23')
 I=inv(B)*A;
 [price,valeur3]=eig(I);
price
Pi2=eye(4)/valeur3-eye(4);
Pi2(isnan(Pi2))=0;
Pi2
filename = 'test1.xlsx';
%xlswrite(filename,I)
j=A*inv(B);
%xlswrite('Econ.circ.xlsx',j,'B19:F23')
[y2,valeur4]=eig(j.');
y2
g2=eye(4)/valeur4-eye(4)
yt1=[0.50 0.50 0.50 0.50]*B*inv(A);
yt2=yt1*B*inv(A);
yt3=yt2*B*inv(A);
yt4=yt3*B*inv(A);
yt5=yt4*B*inv(A);
yt6=yt5*B*inv(A);
yt7=yt6*B*inv(A);
yt1
yt2
yt3
yt4
yt5
yt6
yt7
qt1=[0.50 0.5 0.5 0.5]*B;
qt2=1*qt1;
qt3=1*qt2;
qt4=1*qt3;
qt5=1*qt4;
qt6=1*qt5;
qt7=1*qt6;
qt1
qt2
qt3
qt4
qt5
qt6
qt7
```

```
qt5
qt6
qt7
```

```
disp('SCENARIO C(4x4)')
A=xlsread('Econ.circ.xlsx','C','B24:E27')
B=xlsread('Econ.circ.xlsx','C','H24:K27')
 I=inv(B)*A;
 [price,valeur5]=eig(I);
price
 Pi3=eye(4)/valeur5-eye(4);
Pi3(isnan(Pi3))=0;
Pi3
 j=A*inv(B);
 [y3,valeur6]=eig(j.');
y3
 g3=eye(4)/valeur6-eye(4);
 yt1=[0.54 0.65 0.45 0.28]*B*inv(A);
yt2=yt1*B*inv(A);
yt3=yt2*B*inv(A);
yt4=yt3*B*inv(A);
yt5=yt4*B*inv(A);
yt6=yt5*B*inv(A);
yt7=yt6*B*inv(A);
yt1
yt2
yt3
yt4
yt5
yt6
yt7
qt1=[0.54 0.65 0.45 0.28]*B;
qt2=1.19*qt1;
qt3=1.19*qt2;
qt4=1.19*qt3;
qt5=1.19*qt4;
qt6=1.19*qt5;
qt7=1.19*qt6;
qt1
qt2
qt3
qt4
qt5
qt6
qt7
```

```
disp('SCENARIO D(4x4)')
A=xlsread('Econ.circ.xlsx','D','B3:E6')
B=xlsread('Econ.circ.xlsx','D','H3:K6')
 I=inv(B)*A;
 [price,valeur5]=eig(I);
price
 Pi3=eye(4)/valeur5-eye(4);
Pi3(isnan(Pi3))=0;
Pi3
 j=A*inv(B);
 [y3,valeur6]=eig(j.');
y3
 g3=eye(4)/valeur6-eye(4)
yt1=[0.48 0.57 0.41 0.53]*B*inv(A);
yt2=yt1*B*inv(A);
yt3=yt2*B*inv(A);
yt4=yt3*B*inv(A);
yt5=yt4*B*inv(A);
yt6=yt5*B*inv(A);
yt7=yt6*B*inv(A);
yt1
yt2
yt3
yt4
yt5
yt6
yt7
qt1=[0.48 0.57 0.41 0.53]*B;
qt2=1.18*qt1;
qt3=1.18*qt2;
qt4=1.18*qt3;
qt5=1.18*qt4;
qt6=1.18*qt5;
qt7=1.18*qt6;
qt1
qt2
qt3
qt4
qt5
qt6
qt7
```

XII.B : Résultats calcule Matlab

Loading data...
SCENARIO A (4x4)

A (input)=

$$\begin{bmatrix} 2.00 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 2.00 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 2.00 & 2.00 \\ 0 & 4.00 & 0 & 1.00 \end{bmatrix}$$

B (output)=

$$\begin{bmatrix} 0 & 2.00 & 2.00 & 0 \\ 1.00 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 4.00 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 3.00 \end{bmatrix}$$

price =

$$\begin{bmatrix} 0.21 \\ 0.11 \\ -0.64 \\ 0.06 \end{bmatrix} \quad \begin{bmatrix} 0.21 \\ 0.11 \\ -0.64 \\ 0.06 \end{bmatrix} \quad \begin{bmatrix} 0.20 \\ 0.03 \\ 0.70 \\ -0.68 \end{bmatrix} \quad \begin{bmatrix} 0.66 \\ 0.37 \\ 0.21 \\ 0.62 \end{bmatrix}$$

y1 =

$$\begin{bmatrix} -0.31 \\ 0.79 \\ 0.07 \\ -0.14 \end{bmatrix} \quad \begin{bmatrix} -0.31 \\ 0.79 \\ 0.07 \\ -0.14 \end{bmatrix} \quad \begin{bmatrix} -0.12 \\ -0.90 \\ -0.03 \\ 0.42 \end{bmatrix} \quad \begin{bmatrix} 0.40 \\ 0.71 \\ 0.45 \\ 0.38 \end{bmatrix}$$

g1 =

$$\begin{bmatrix} -1.74 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1.74 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 2.59 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -0.11 \end{bmatrix}$$

yt1 =

0.35	0.62	0.40	0.34

yt2 =

0.31	0.53	0.35	0.31

yt3 =

0.27	0.40	0.31	0.31

yt4 =

0.20	0.10	0.27	0.40

yt5 =

0.05	-0.84	0.20	0.79

yt6 =

-0.42	-4.07	0.05	2.26

yt7 =

-2.03	-15.54	-0.42	7.61

qt1 =

0.71	2.60	0.80	1.14

qt2 =

0.63	2.31	0.71	1.01

qt3 =

0.56	2.06	0.63	0.90

qt4 =

0.50	1.83	0.56	0.80

qt5 =

0.45	1.63	0.50	0.72

qt6 =

0.40	1.45	0.45	0.64

qt7 =

0.35	1.29	0.40	0.57

(SCENARIO B(4x4))

A (input)=

$$\begin{bmatrix} 2.00 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 2.00 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 2.00 & 2.00 \\ 0 & 4.00 & 0 & 1.00 \end{bmatrix}$$

B (output)=

$$\begin{bmatrix} 0 & 2.00 & 2.00 & 0 \\ 2.00 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 4.00 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 3.00 \end{bmatrix}$$

price =

$$\begin{bmatrix} -0.15 \\ -0.10 \\ 0.56 \\ -0.08 \end{bmatrix} \quad \begin{bmatrix} -0.15 \\ -0.10 \\ 0.56 \\ -0.08 \end{bmatrix} \quad \begin{bmatrix} -0.18 \\ -0.05 \\ -0.71 \\ 0.68 \end{bmatrix} \quad \begin{bmatrix} 0.41 \\ 0.41 \\ 0.00 \\ 0.82 \end{bmatrix}$$

Pi2 =

$$\begin{bmatrix} -2.04 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -2.04 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 3.08 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.00 \end{bmatrix}$$

y2 =

$$\begin{bmatrix} 0.47 \\ -0.66 \\ -0.21 \\ 0.20 \end{bmatrix} \quad \begin{bmatrix} 0.47 \\ -0.66 \\ -0.21 \\ 0.20 \end{bmatrix} \quad \begin{bmatrix} -0.22 \\ -0.89 \\ -0.05 \\ 0.40 \end{bmatrix} \quad \begin{bmatrix} 0.50 \\ 0.50 \\ 0.50 \\ 0.50 \end{bmatrix}$$

g2 =

$$\begin{bmatrix} -2.04 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -2.04 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 3.08 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.00 \end{bmatrix}$$

yt1 =

0.50 0.50 0.50 0.50

yt2 =

0.50 0.50 0.50 0.50

yt3 =

0.50 0.50 0.50 0.50

yt4 =

0.50 0.50 0.50 0.50

yt5 =

0.50 0.50 0.50 0.50

yt6 =

0.50 0.50 0.50 0.50

yt7 =

0.50 0.50 0.50 0.50

qt1 =

1.00 3.00 1.00 1.50

qt2 =

1.00 3.00 1.00 1.50

qt3 =

1.00 3.00 1.00 1.50

qt4 =

1.00 3.00 1.00 1.50

qt5 =

1.00 3.00 1.00 1.50

qt6 =

1.00 3.00 1.00 1.50

qt7 =

1.00 3.00 1.00 1.50

SCENARIO C(4x4)

A (input)=

$$\begin{bmatrix} 2.00 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 2.00 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 2.00 & 2.00 \\ 0 & 4.00 & 0 & 1.00 \end{bmatrix}$$

B (output)=

$$\begin{bmatrix} 0 & 2.00 & 2.00 & 0 \\ 2.00 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 4.00 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 5.00 \end{bmatrix}$$

price =

$$\begin{bmatrix} 0.12 \\ 0.17 \\ -0.66 \\ 0.04 \end{bmatrix} \quad \begin{bmatrix} 0.12 \\ 0.17 \\ -0.66 \\ 0.04 \end{bmatrix} \quad \begin{bmatrix} 0.13 \\ 0.02 \\ 0.71 \\ -0.70 \end{bmatrix} \quad \begin{bmatrix} 0.58 \\ 0.49 \\ 0.21 \\ 0.61 \end{bmatrix}$$

Pi3 =

$$\begin{bmatrix} -1.96 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1.96 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 4.73 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.19 \end{bmatrix}$$

y3 =

$$\begin{bmatrix} -0.44 & -0.44 & 0.16 & 0.54 \\ 0.67 & 0.67 & 0.89 & 0.65 \\ 0.12 & 0.12 & 0.03 & 0.45 \\ -0.13 & -0.13 & -0.43 & 0.28 \end{bmatrix}$$

yt1 =

0.65	0.80	0.54	0.32

yt2 =

0.80	1.13	0.65	0.30

yt3 =

1.13	2.30	0.80	-0.10

yt4 =

2.30	8.25	1.13	-2.76

yt5 =

8.25	41.36	2.30	-18.40

yt6 =

41.36	229.85	8.25	-108.50

yt7 =

229.85	1308.30	41.36	-625.22

qt1 =

1.30	2.88	1.08	1.40

qt2 =

1.55	3.43	1.29	1.67

qt3 =

1.84	4.08	1.53	1.98

qt4 =

2.19	4.85	1.82	2.36

qt5 =

2.61	5.78	2.17	2.81

qt6 =

3.10	6.87	2.58	3.34

qt7 =

3.69	8.18	3.07	3.98

SCENARIO D(4x4)

A(input)=

$$\begin{bmatrix} 2.00 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 2.00 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 2.00 & 2.00 \\ 0 & 2.00 & 0 & 1.00 \end{bmatrix}$$

B (output)=

$$\begin{bmatrix} 0 & 2.00 & 2.00 & 0 \\ 2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 4.00 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 3.00 \end{bmatrix}$$

price =

$$\begin{bmatrix} 0.10 \\ 0.21 \\ -0.69 \\ 0.00 \end{bmatrix} \quad \begin{bmatrix} 0.10 \\ 0.21 \\ -0.69 \\ 0.00 \end{bmatrix} \quad \begin{bmatrix} 0.21 \\ 0.06 \\ 0.71 \\ -0.67 \end{bmatrix} \quad \begin{bmatrix} 0.57 \\ 0.49 \\ 0.19 \\ 0.63 \end{bmatrix}$$

Pi3 =

$$\begin{bmatrix} -1.90 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1.90 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 2.63 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.18 \end{bmatrix}$$

y3 =

$$\begin{bmatrix} -0.42 & -0.42 & -0.20 & 0.48 \\ 0.65 & 0.65 & -0.73 & 0.57 \\ 0.08 & 0.08 & -0.06 & 0.41 \\ -0.17 & -0.17 & 0.65 & 0.53 \end{bmatrix}$$

g3 =

$$\begin{bmatrix} -1.90 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1.90 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 2.63 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.18 \end{bmatrix}$$

yt1 =

0.57 0.67 0.48 0.63

yt2 =

0.67 0.78 0.57 0.75

yt3 =

0.78 0.90 0.67 0.91

yt4 =

0.90 0.95 0.78 1.17

yt5 =

0.95 0.75 0.90 1.71

yt6 =

0.75 -0.48 0.95 3.23

yt7 =

-0.48 -5.54 0.75 8.19

qt1 =

1.14 2.60 0.96 1.59

qt2 =

1.35 3.07 1.13 1.88

qt3 =

1.59 3.62 1.34 2.21

qt4 =

1.87 4.27 1.58 2.61

qt5 =

2.21 5.04 1.86 3.08

qt6 =

2.61 5.95 2.20 3.64

qt7 =

3.08 7.02 2.59 4.29

XII.C : Indicateur de circularité de Yifang CL (%)

Exemple de calcule pour le scénario de référence (A) *compostage et brulage*

$p_1 = 0.66 \quad p_2 = 0.37 \quad p_3 = 0.21 \quad p_4 = 0.32$

$\alpha_1 = \frac{2}{2} = 1 \quad \beta_1 = \frac{2}{2} * \frac{0.37}{0.66} \qquad cl = \alpha * \beta = 56.1\%$

$OT * p * cl = (2 * p_1 * 0.56) + (0 * p_1 * 0.56) + (0 * p_1 * 0.56) + (0 * p_1 * 0.56) = 2.22$

$CL.matière = \frac{OT * P * cl}{Qw * p_1} = \frac{2.22}{9 * p_1} = 40\%$

$\alpha_1 = \frac{4}{4} = 1 \quad \beta_1 = \frac{3}{2} * \frac{0.37}{0.62} \qquad cl = \alpha * \beta = 89.5\%$

$OT * p * cl = (0 * p_3 * 0.895) + (0 * p_3 * 0.895) + (0 * p_3 * 0.895) + (3 * p_3 * 0.895) = 1.67$

$CL.énergie = \frac{OT * P * cl}{Qw * p_3} = \frac{1.67}{9 * p_3} = 30\%$

RESULTATS POUR SCENARIO

SCENARIO
A

	azote	déchet	veget	énergie	azote	déchet	veget	énergie	prix
agri	2	0	0	0	0	2	2	0	0,66
compost	0	2	0	0	1	0	0	0	0,37
met.urb	0	0	2	2	0	4	0	0	0,21
val.énerg	0	4	0	1	0	0	0	3	0,62

Alpha1	1	OT*p*cl	2,22	CL.mat	0,4
Alpha2	0,561				
cl	0,561				

Alpha1	1	OT*p*cl	1,67	CL.énerg	0,3
Alpha2	0,895				
cl	0,895				

SCENARIO
B

	azote	déchet	veget	énergie	azote	déchet	veget	énergie	prix
agri	2	0	0	0	0	2	2	0	0,41
compost	0	2	0	0	2	0	0	0	0,41
met.urb	0	0	2	2	0	4	0	0	0
val.énerg	0	4	0	1	0	0	0	3	0,82

Alpha1	1	OT*p*cl	2,46	CL.mat	0,7
Alpha2	1				
cl	1				

Alpha1	1	OT*p*cl	0,82	CL.énerg	0,1
Alpha2	0,333				
cl	0,333				

SCENARIO
C

	azote	déchet	veget	énergie	azote	déchet	veget	énergie	prix
agri	2	0	0	0	0	2	2	0	0,58
compost	0	2	0	0	2	0	0	0	0,49
met.urb	0	0	2	2	0	4	0	0	0,21
val.énerg	0	4	0	1	0	0	0	5	0,61

Alpha1	1	OT*p*cl	2,94	CL.mat	0,6
Alpha2	0,845				
cl	0,845				

Alpha1	1	OT*p*cl	0,98	CL.énerg	0,2
Alpha2	0,321				
cl	0,321				

SCENARIO
D

	azote	déchet	veget	énergie	azote	déchet	veget	énergie	prix
agri	2	0	0	0	0	2	2	0	0,57
compost	0	2	0	0	2	0	0	0	0,49
met.urb	0	0	2	2	0	4	0	0	0,19
val.énerg	0	2	0	1	0	0	0	3	0,63

Alpha1	1	OT*p*cl	2,94	CL.mat	0,6
Alpha2	0,86				
cl	0,86				

Alpha1	0,5	OT*p*cl	0,49	CL.énerg	0,1
Alpha2	0,519				
cl	0,259				

Résume des résultats Indicateur de circularité de Yifang (*CL*)

	indicateur écon.circ matière	**indicateur écon.circ énergie**
A : compostage et brulage	0,373737374	0,298387097
B : amélioration compostage	0,666666667	0,111111111
C : amélioration brulage déchets	0,563218391	0,178506375
D : tri à la source	0,573099415	0,086419753

XII.D: Indicateurs de circularité de la Fondation Ellen MacActhur.

Exemple de calcule pour le scénario de référence *compostage et brulage*

$M = input.au.début = azote \quad X = taux.de.profit = 0.9$

$ratio.compostage(Fr) = 1/2 \quad ratiodéchetcollecté(Cr) = \frac{2}{2} = 1 \quad Ec = Ef = 0.5 \quad V = M(1-Fr)$

$Wo = M(1-Cr) \quad Wc = M(1-Ec)Cr \quad Wf = M(\frac{(1-Ef)Fr}{Ef}) \quad W = Wo + \frac{Wf+Wc}{2}$

$LFI(Indicateur.flux.lineal) = \frac{(V+W)}{(2*M + \frac{(Wf-Wc)}{2})} = 0.33 \quad Indic.flux.circ.mat(MCI) = (1 - LFI * X) = 0.7$

$M = input.au.début = végétaux \quad X = taux.de.profit = 0.9$

$ratioval(Fr) = 3/3 \quad ratiodéchetcollecté(Cr) = \frac{4}{4} = 1 \quad Ec = Ef = 0.5 \quad V = M(1-Fr)$

$Wo = M(1-Cr) \quad Wc = M(1-Ec)Cr \quad Wf = M(\frac{(1-Ef)Fr}{Ef}) \quad W = Wo + \frac{Wf+Wc}{2}$

$LFI(Indicateur.flux.lineal) = \frac{(V+W)}{(2*M + \frac{(Wf-Wc)}{2})} = 0.33 \quad Indic.flux.circ.énergie(MCI) = (1 - LFI * X) = 0.7$

RESULTATS POUR SCENARIO

SCENARIO A	CL.mat			Cl.énerg		
Fr	0,5	Fu	0	1	Fu	0
Cr	1	Cu	0	1	Cu	0
V	1	Ec	0,5	0	Ec	0,5
Wo	0	Ef	0,5	0	Ef	0,5
Wc	0			1		
Wf	1			2		
W	0,5			1,5		
LFI	0,33333333			0,33333333		
MCI	0,7			0,7		

SCENARIO B	CL.mat			Cl.énerg		
Fr	1	Fu	0	1	Fu	0
Cr	1	Cu	0	1	Cu	0
V	0	Ec	0,5	0	Ec	0,5
Wo	0	Ef	0,5	0	Ef	0,5
Wc	0			1		
Wf	2			2		
W	1			1,5		
LFI	0,2			0,33333333		
MCI	0,82			0,7		
SCENARIO C	CL.mat			Cl.énerg		
Fr	1	Fu	0	1,66666667	Fu	0
Cr	1	Cu	0	1	Cu	0
V	0	Ec	0,5	-1,33333333	Ec	0,5
Wo	0	Ef	0,5	0	Ef	0,5
Wc	0			1		
Wf	2			3,33333333		
W	1			2,16666667		
LFI	0,2			0,16129032		
MCI	0,82			0,85483871		

SCENARIO D	CL.mat			Cl.énerg		
Fr	1	Fu	0	1	Fu	0
Cr	1	Cu	0	2	Cu	0
V	0	Ec	0,5	0	Ec	0,5
Wo	0	Ef	0,5	0	Ef	0,5
Wc	0			2		
Wf	2			2		
W	1			2		
LFI	0,2			0,5		
MCI	0,82			0,55		

Résume des résultats indicateurs de circularité de la Fondation Ellen MacArthur.

	indicateur écon.circ matière	**indicateur écon.circ énergie**
compostage et brulage	0,7	0,7
amélioration compostage	0,82	0,7
amélioration brulage déchet	0,82	0,85483871
tri à la source	0,82	0,55

XII.E : Annexe case spéciale économie dans la biosphère

Processus 1 : Un processus économique de type *Haber-Bosch*[147] en utilisant une usine comme *fond* dont la fonction est de produire *une capital économique* (ressource 1, l'azote) avec surplus (discussion sur les surplus de processus naturels), qui utilise le bien du capital écologique (ressources 1, l'azote) comme intrant et une capital économique » (ressource 3, le travail). D'autres variations de l'azote comme le diazote et oxyde d'azote sont possibles mais la proposition azote = diazote = oxyde d'azote = ressource 1 sera suffisant pour nos besoins.

Transfert 1-2 : Le transfert entre le processus 1 et le processus 2 peut être caractérise comme un sortie du *le capital écologique* (ressource 1) du processus 1 vers le processus 2, qui l'utilise comme un intrant

Processus 2 : Un processus économique comme l'agriculture qui utilise la ferme comme *fond* dont la fonction est de produire un capital économique (ressource 2, les végétaux) , avec surplus et un déchet (ressource 4), en utilisant le bien du capital écologique (ressource 1, l'azote) et un bien du capital économique (ressource 3, le travail).

Transfert 2-3 : Le transfert entre le processus 2 et le processus 3 peut être caractérise comme un sortie du *le capital économique* (ressource 3) du processus 2 vers le processus 3, qui l'utilise comme un intrant.

Processus 3 : Un processus économique comme l'alimentation qui utilise la ville comme *fond* dont la fonction est de nourrir un capital économique (ressource 3, le travail) avec surplus et un déchet (ressource 4), en utilisant le bien du capital économique (ressource 2, les végétaux) et un bien du capital économique (ressource 4, le travail).

Transfert 3-4 : Le transfert entre le processus 3 et le processus 4 peut être caractérise comme un sortie du *déchet économique* (ressource 4) du processus 3 vers le processus 4, qui l'utilise comme un intrant.

Processus 4 : Un processus économique qui produit un service de traitement du déchet avec un entrée du travail (ressource 3) et du déchet économique (ressource 4), que produise une petite quantité du déchet non-éliminable (ressource 4).

Nous supposons en adition, la représentation des certains flux de la biosphère à travers du processus 5 (Hydrosphère), 6 (Atmosphère).

Processus 5 : Les processus écologiques d'eutrophisation de l'azote dans l'hydrosphère utilisent NO_3- provenant surtout des nitrates agricoles (transfert de NO_3- vers l'hydrosphère) dont $a_{54} = 14.8$ ou *leaching* dans la figure 8.1, ces nutriments dopent la production de phytoplancton et de quelques espèces aquatiques, en augmentant le taux moyen de chlorophylle de l'eau en $b_{55} = 25$ [148].

Transfert 5-6 : Le transfert entre le processus 5 et le processus 6 peut-être caractérise comme une sortie du *déchet économique* (ressource 4) du processus 5 vers le processus 6, qui l'utilise comme un intrant.

---

[147] Pour développement détaillé sur le processus de production d'azote artificiel *Haber-Bosch*, consulter le premier chapitre de la thèse.

[148] Pour développement détaillé sur le processus d'eutrophisation et le taux moyen de chlorophylle qui peut être mesure en mg/m^3, consulter le chapitre 1 de la thèse.

Processus 6 : Un processus écologique comme la pluie acide en utilisant l'atmosphère comme *fond* dont la fonction est de générer un polluant (ressource 6, la pluie acide que produise la variation du pH dans la mer) [149] qui utilise le déchet ou polluant économique (ressource 4, NO_x) dont $a_{64} = b_{34} + b_{44} = 5.1$.

	Matrice d'inputs (A)	Matrice d'outputs (B)
Processus 5 (Hydrosphère)	[. . . a_{54} . .]	[. . . . . b_{55} .]
Processus 6 (Atmosphère)	[. . . a_{64} . .]	[. . . . . . b_{66}]

Le système peut être présenté à travers d'une structuration Sraffian, sous forme matricielle comme suit:

$$\begin{bmatrix} 10 & . & 1.34. & . & . & . \\ 13.6 & . & 1.34 & 0.3 & . & . \\ . & 4.8 & 1.34 & . & . & . \\ . & . & 1.34 & 5.2 & . & . \\ . & . & . & 14.8 & . & . \\ . & . & . & 5.1. & . & 5.6. \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_1 \\ p_2 \\ p_3 \\ p_4 \\ p_5 \\ p_6 \end{bmatrix} .(1+\pi) = \begin{bmatrix} 13.6 & . & . & . & . & . \\ . & 10 & . & 0.4 & . & . \\ . & . & 5.36 & 4.6 & . & . \\ . & . & . & 0.5 & . & . \\ . & . & . & . & 25 & . \\ . & . & . & . & . & 4.3. \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_1 \\ p_2 \\ p_3 \\ p_4 \\ p_5 \\ p_6 \end{bmatrix}.$$

Capital naturel (azote)
Bien économique (végétaux)
Bien économique (travail)
Déchet économique (Nox ou Nitrate)
prolifération d'algue (Cyanobactéties)
pluies acides (pH)

Au chapitre 5, nous avons dit qu'une représentation abstraite des relations entre les commodités à l'intérieur d'un système de régulation a été proposée par Sraffa. Mais ce système peut être l'expression des *relations fondamentalement asymétriques* entre la biosphère et l'économie. Dans ce sens, il n'est pas

[149] L'eau pure a un pH de 7,0. Cependant, la pluie normale est légèrement acide formé un pH d'environ 5,6 à des concentrations de CO_2 dans l'atmosphère typique, la pluie plus acide peut être mesure avec un pH d'environ 4,3.

logique des propose un système des prix que combine des commodités de l'économie et des services écosystémiques, de façon d'intégrer des secteurs qui ont été externalisés de l'économie. Cette a*symétrie* peut-être considère comme une démarche d'appropriation de l'environnement comme a été décrit dans le livre *Is Capitalism sustainable?* (O'Connor, 1994).

O'Connor en 1993 propose un cadre de production jointe en divisant un système en deux compartiments, l'économie et l'environnement. Pour mettre en place cette formalisation de 4 processus et 4 commodités, le système peut être compact en utilisant la matrice de 6x6x vers une matrice 4x4. Pour développement détaillé sur l'agrégation des matrices, consulter l'annexé du chapitre.

Inputs : Économie (X_{11}....X_{14} et X_{21}....X_{24}) et Environnement (X_{31}....X_{34} et X_{41}....X_{44}).

Output: Économie (Z_{11}....Z_{14} et Z_{21}....Z_{24}) et Environnement (Z_{31}....Z_{34} et Z_{41}....Z_{44}).

$$X = \begin{bmatrix} X_{11} & X_{12} & X_{13} & X_{14} \\ X_{21} & X_{22} & X_{23} & X_{24} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ X_{31} & X_{32} & X_{33} & X_{34} \\ X_{41} & X_{42} & X_{43} & X_{44} \end{bmatrix} \qquad Z = \begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} & Z_{13} & Z_{14} \\ Z_{21} & Z_{22} & Z_{23} & Z_{24} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ Z_{31} & Z_{32} & Z_{33} & Z_{34} \\ Z_{41} & Z_{42} & Z_{43} & Z_{44} \end{bmatrix} \tag{c.1}$$

Le système compact peut être exprimé comme 4x4 :

$$\begin{bmatrix} 33.9 & 5.5 & 0 & 0 \\ 1.34 & 5.2 & 0 & 0 \\ 10 & 0 & 0 & 0 \\ 10 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} p_1 \\ p_2 \\ p_3 \\ p_4 \end{bmatrix} \cdot (1+\pi) = \begin{bmatrix} 28.2 & 5 & 0 & 0 \\ 0 & 0.5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 25 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 4.3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_1 \\ p_2 \\ p_3 \\ p_4 \end{bmatrix} \tag{c.2}$$

Le prix relatif des biens économiques est représenté par p_1 (azote + végétal + travail), p_2 comme le prix du déchet recycle, p_3 comme le prix à payer par la prolifération d'algues (NO_3) et p_4 représenté le prix a payer par la pluie acide (NO_x). Les processus sont représentés par l'économie 8 (processus 1), le recyclage des déchets (processus 2), l'eutrophisation de l'hydrosphère (processus 3) et la pollution de l'atmosphère.

Les prix sont calculés en utilisant l'outil Matlab Integrated Development Environment.

La valeur propre $\lambda_{\max} = 9.8813$

Les surplus sont [(1/9.8813)-1]*100 = --101.20, dont surplus 1= surplus 2 =surplus 3=surplus 4 = π =- -101.20%

Tableau XII.E.I: Prix normalises des ressources en scénario B *case spéciale* ***a*** de l'azote

	Prix 1=1	Prix 2=1	Prix 3=1	Prix 4=1
p_1 (Écon)	1.0000	-0.1935	24.7034	4.2490
p_2 (déchet)	-5.1672	1.0000	-127.6469	-21.9553
p_3 (NO_3)	0.0405	-0.0078	1.0000	0.1720
p_4 (NO_x)	0.2354	-0.0455	5.8140	1.0000

Source: L'auteur

O'Connor en 1993 propose un cadre de production jointe en divisant un système en deux compartiments, l'économie et l'environnement. Pour mettre en place cette formalisation de 4 processus et 4 commodités, le système peut être compact en utilisant la matrice de 6x6x vers une matrice 4x4.

	INPUT					
	azote	veget	travail	nox et nit	algue	pluie
P1	10	0	1,34	0	0	0
P2	13,6	0	1,34	0,3	0	0
P3	0	4,8	1,34	0	0	0
P4	0	0	1,34	5,2	0	0
P5	0	0	0	14,8	0	0
P6	0	0	0	5,1	0	5,6

	OUTPUT					
	azote	veget	travail	nox et nit	algue	pluie
P1	13,6	0	0	0	0	0
P2	0	10	0	0,4	0	0
P3	0	0	5,36	4,6	0	0
P4	0	0	0	0,5	0	0
P5	0	0	0	0	25	0
P6	0	0	0	0	0	4,3

	INPUT					
P.écon	23,6	4,8	4,02	0,3	0	0
P4	0	0	1,34	5,2	0	0
P5	0	0	10	0	0	0
P6	0	0	10	0	0	0

	OUTPUT					
P.écon	13,6	10	5,36	5	0	0
P4	0	0	0	0,5	0	0
P5	0	0	0	0	25	0
P6	0	0	0	0	0	4,3

	INPUT			
	A+V+T	nox et nit	algue	pluie
P.écon	32,42	0,3	0	0
P4	1,34	5,2	0	0
P5	10	0	0	0
P6	10	0	0	0

	OUTPUT			
	A+V+T	nox et nit	algue	pluie
P.écon	28,96	5	0	0
P4	0	0,5	0	0
P5	0	0	25	0
P6	0	0	0	4,3

À=azote V=Végétaux T=Travail NO_X=oxyde d´azote Nit=Nitrate

Tableau XII.E.II : Normalisation matrice 4x4 (économie + recyclage + atmosphère + hydrosphère)

ans = 4 Loading data... Enter commodity to which prices should be normalised (max 4): 1 Applying Sraffa Method to: Peanuts and Oranges Initial prices will be ignored Maximum profit: 9.8813 Prices 1.0000 -5.1672 0.0405 0.2354	ans = 4 Loading data... Enter commodity to which prices should be normalised (max 4): 2 Applying Sraffa Method to: Peanuts and Oranges Initial prices will be ignored Maximum profit: 9.8813 Prices -0.1935 1.0000 -0.0078 -0.0455	ans = 4 Loading data... Enter commodity to which prices should be normalised (max 4): 3 Applying Sraffa Method to: Peanuts and Oranges Initial prices will be ignored Maximum profit: 9.8813 Prices 24.7034 -127.6469 1.0000 5.8140	ans = 4 Loading data... Enter commodity to which prices should be normalised (max 4): 4 Applying Sraffa Method to: Peanuts and Oranges Initial prices will be ignored Maximum profit: 9.8813 Prices 4.2490 -21.9553 0.1720 1.0000

XIII.A : Tableau intrants (A) et sorties (B) décomposable

Intrants (A)

	matière primaire	énergie primaire	capital humain	service travail	énergie raffiné	aliments	Capit al fixe	capital urbain	déchet	déchet ultime	compost
Soleil (fond)	0	+	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ménages	0	0	+	0	0	+	0	+	0	0	0
production d'énergie	+	+	0	+	0	0	0	0	0	0	0
agriculture	+	+	0	+	0	0	0	0	0	0	0
met.urbain	0	0	0	0	+	+	0	+	0	0	0
agri.urbain	+	+	0	+	0	0	0	0	0	0	+
entretien capital fixe	0	0	0	+	0	0	+	0	0	0	0
compostage	0	0	0	+	0	0	0	0	+	0	0
incinération	0	0	0	+	+	0	+	+	+	0	0
mise en décharge	0	0	0	+	0	0	0	+	+	0	0

Sorties (B)

	matière primaire	énergie primaire	capital humain	service travail	énergie raffiné	aliments	capital fixe	capital urbain	déchet	déchet ultime	compost
Soleil (fond)	0	+	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ménages	0	0	+	+	0	0	0	0	0	0	0
production d'énergie	0	0	0	0	+	0	0	0	0	0	0
agriculture	0	0	0	0	0	+	0	0	0	0	0
met.urbain	0	0	0	0	0	0	0	+	+	0	0
agri.urbain	0	0	0	0	0	+	0	+	0	0	0
Entretien capital fixe	0	0	0	0	0	0	+	0	0	0	0
compostage	0	0	0	0	0	0	0	+	0	0	+
incinération	0	0	0	0	+	0	0	0	0	0	0
Mise en décharge	0	0	0	0	0	0	0	0	0	+	0

XIII.B : Code Matlab hyperbole

Code pour la mise en décharge

```
disp('-----------------------------------------------')
if (1)
    A = [10 0;
         15 10];
    B = [15 15;
          0 10];
    alpha = (A(1,1)*B(2,2)-B(2,1)*A(1,2))/det(A) ;
    beta  = (B(1,1)*A(2,2)-A(2,1)*B(1,2))/det(A) ;
    gamma = det(B)/det(A) ;
% choose a range over which to plot
psi2 = -10:0.01:10 ;
% calculate psi1 over that range
psi1 = (beta*psi2-gamma)./(psi2-alpha) ;
clf
plot(psi2,psi1) % plot hyperbola
ax=axis; % store current axes
hold on
```

Code pour l'incineration

```
disp('-----------------------------------------------')
if (1)
    A = [10 12;
          5 15];
    B = [15 15;
          0 12];
    alpha = (A(1,1)*B(2,2)-B(2,1)*A(1,2))/det(A) ;
    beta  = (B(1,1)*A(2,2)-A(2,1)*B(1,2))/det(A) ;
    gamma = det(B)/det(A) ;
% choose a range over which to plot
psi2 = -10:0.01:10 ;
% calculate psi1 over that range
psi1 = (beta*psi2-gamma)./(psi2-alpha) ;
clf
plot(psi2,psi1) % plot hyperbola
ax=axis; % store current axes
hold on
```

Code pour le compostage

```
disp('-----------------------------------------------')
if (1)
    A = [13 0;
         5 15];
    B = [15 15;
          0 1];
    alpha = (A(1,1)*B(2,2)-B(2,1)*A(1,2))/det(A) ;
    beta  = (B(1,1)*A(2,2)-A(2,1)*B(1,2))/det(A) ;
    gamma = det(B)/det(A) ;
% choose a range over which to plot
psi2 = -10:0.01:10 ;
% calculate psi1 over that range
```

XIII.C : Vecteur de prix relatif et d'activite

Tableau XIII.C.1: Mise en décharge **g_3=50%**

Vecteur de prix de la matrice 4x4

0	0	0.75	0
0	0.89	0.60	0
0	0	0	0.00
1.00	0.45	0.30	-1.00

Vecteur activite de la matrice 4x4

1.00	-0.41	-0.00	-0.00
0	0.82	-0.71	-0.71
0	-0.41	0.71	0.71
0	0	0	0.00

Tableau XIII.C.2: Mise en décharge **g_3=20%**

Vecteur de prix de la matrice 4x4

0	0	0.42	0
0	0.93	0.84	0
0	0	0	0.00
1.00	0.37	0.34	-1.00

Vecteur d'activite de la matrice 4x4

1.00	-0.67	-0.00	-0.00
0	0.67	-0.71	-0.71
0	-0.33	0.71	0.71
0	0	0	0.00

Tableau XIII.C.3: Incinération des déchets **g_3=50%**

Vecteur de prix de la matrice 4x4

0	0	0	0.30
0	0	0.59	0.24
0.99	0.99	-0.77	-0.90
0.11	-0.11	-0.23	-0.18

Vecteur d'activite de la matrice 4x4

1.00	-0.04	0.41	0.43
0	0.55	-0.82	-0.28
0	-0.69	0.41	0.64
0	0.47	0	0.58

Tableau XIII.C.3: Incinération des déchets **g_3=20%**

Vecteur de prix de la matrice 4x4

0	0	0	0.15
0	0	0.47	0.31
0.99	0.99	-0.86	-0.92
0.11	-0.11	-0.21	-0.18

Vecteur d'activite de la matrice 4x4

1.00	-0.04	0.67	0.56
0	0.53	-0.67	0.08
0	-0.69	0.33	0.52
0	0.49	0.00	0.64

Tableau XIII.C.4: Incinération des déchets **g=50%**

Vecteur de prix de la matrice 6x6

0.01	-0.44	0.13	0.13	0.27	0.27
-0.07	-0.30	-0.01	-0.61	-0.78	-0.78
-0.29	0.27	0.07	-0.34	0.28	0.28
0.62	-0.62	-0.14	0.70	-0.44	-0.44
-0.00	-0.25	-0.83	-0.01	-0.04	-0.04
-0.73	-0.45	0.52	0.10	-0.06	-0.06

Vecteur d'activite de la matrice 6x6

0.06	-0.16	-0.08	-0.08	-0.71	-0.08
-0.48	-0.32	0.00	0.00	-0.45	-0.07
0.08	-0.82	0.99	0.99	-0.08	-0.02
-0.25	0.39	0.07	0.07	-0.09	-0.02
-0.19	0.12	0.00	0.00	-0.52	0.99
0.81	-0.18	0.00	0.00	-0.11	-0.02

Tableau XIII.C.5: Compostage des déchets urbain **g_3=50%**

Vecteur de prix de la matrice 4x4

0	0	0	0.00
-0.71	-0.71	-0.97	0.97
0.18	0.18	-0.10	0.10
0.56	0.56	0.24	-0.24

Vecteur activite de la matrice 4x4

1.00	0.03	0.03	-1.00
0	-0.57	-0.57	0.00
0	0.71	0.71	0.00
0	-0.01	-0.01	0.00

Tableau XIII.C.6: Compostage des déchets urbain $\mathbf{g_3}$=**20%**

Vecteur de prix de la matrice 4x4

0	0	0	0.44
0.66	0.66	-0.95	-0.87
-0.35	-0.35	-0.22	-0.15
-0.43	-0.43	0.20	0.17

Vecteur d'activite de la matrice 4x4

1.00	0.88	0.02	0.02
0	0.36	-0.55	-0.55
0	0.14	0.71	0.71
0	0.28	-0.01	-0.01

Tableau XIII.C.7: Compostage des déchets urbain **g=50%**

Vecteur de prix de la matrice 6x6

0.02	0.02	0.04	0.04	0.27	0.27
0.11	0.11	-0.24	-0.24	-0.82	-0.82
-0.31	-0.31	-0.44	-0.44	0.28	0.28
0.47	0.47	0.65	0.65	-0.34	-0.34
-0.45	-0.45	0.38	0.38	-0.05	-0.05
-0.65	-0.65	-0.32	-0.32	-0.08	-0.08

Vecteur d'activite de la matrice 6x6

-0.14	-0.14	-0.07	-0.07	-0.04	-0.04
-0.11	-0.11	-0.12	-0.12	0.00	0.00
0.21	0.21	-0.53	-0.53	0.99	0.99
-0.12	-0.12	0.22	0.22	0.02	0.02
-0.69	-0.69	0.51	0.51	-0.00	-0.00
-0.49	-0.49	-0.58	-0.58	-0.01	-0.01

Tableau XIII.C.8: Compostage des déchets urbain **g=20%**

Vecteur de prix de la matrice 6x6

-0.00	-0.00	0.03	0.03	0.27	0.27
0.10	0.10	-0.22	-0.22	-0.82	-0.82
-0.31	-0.31	-0.44	-0.44	0.28	0.28
0.47	0.47	0.65	0.65	-0.34	-0.34
-0.45	-0.45	0.36	0.36	-0.05	-0.05
-0.62	-0.62	-0.24	-0.24	-0.08	-0.08

Vecteur d'activite de la matrice 6x6

0.06	-0.06	0.06	0.06	0.04	0.04
-0.05	-0.05	0.10	0.10	-0.00	-0.00
0.21	0.21	0.45	0.45	-0.99	-0.99
-0.12	-0.12	-0.21	-0.21	-0.02	-0.02
-0.68	-0.68	-0.51	-0.51	0.00	0.00
-0.49	-0.49	0.60	0.60	0.01	0.01

XIII.D : Grille de lecture des *Fourth cheaps* et de production jointe

	Prédation pure	Consommation + secteur ext	Consommation + secteur int
Matière première (MP)	Processus minier d'exploitation MP MP A FT E A= [**0** 0 1.34 5] B= [**13.6** 0 0 2] B-A= [**13.6** 0 -1.34 -3]	Processus minier d'exploitation MP MP A FT E A= [0 0 1.34 5] B= [13.6 0 0 2] B-A= [13.6 0 -1.34 -3] Secteur de reproduction externe (FOND) MP A FT E A= [**20** 0 0 0] B= [**20** 0 0 0] B-A= [0 0 0 0]	MP A FT E Processus minier A= [0 0 1.34 5] B= [**13.6** 0 0 2] Reproduction MP A= [20 0 1.34 1] B= [18 0 0 0] B-A= [-13.6 0 0 -3] [-2 0 -1,34 -1]
Aliments (A)	Agriculture MP A FT E A= [13 0 1.34 5] B= [0 10 0 2] B-A= [13.6 10 -1.34 -3]	Agriculture MP S A FT E A= [13 5 0 1.34 5] B= [0 0 10 0 2] B-A= [13.6 10 -1.34 -3] Secteur d'entretien externe de sol (S) (FOND) MP S A FT E A= [0 **20** 0 0 0] B= [0 **20** 0 0 0] B-A= [0 0 0 0 0]	MP A S FT E Agriculture A= [13 5 0 1.34 5] B= [0 0 10 0 2] Préparation de sol A= [0 0 **10** 1.34 5] B=[0 **20** 0 0 2] B-A= [-13 -5 10 -1.34 -3] [0 20 -10 -1,34 -3]
Force de travail (FT)	Métabolisme urbain MP A FT E A= [0 4.8 **1.34** 5] B= [0 0 **0** 2] B-A= [0 -4.8 **-1.34** -3]	Métabolisme urbain MP A FT E A= [0 4.8 **1.34** 5] B= [0 0 **0** 2] B-A= [0 -4.8 -1.34 -3] Secteur de reproduction de la force de travaux (MARX) MP A FT E A= [0 4.8 **0** 5] B= [0 0 **1.34** 2] B-A= [0 -4.8 1.34 0]	MP A FT E Métabolisme urbain A= [0 4.8 **1.34** 5] B= [0 0 **5.36** 2] B-A= [0 -4.8 4,02 -3]
Energie (E)	Agriculture MP A FT E A= [13 0 1.34 **5**] B= [0 10 0 **2**] B-A= [13.6 10 -1.34 -3]	Agriculture MP A FT E A= [13 0 1.34 5] B= [0 10 0 2] B-A= [13.6 10 -1.34 -3] Soleil-Secteur de reproduction externe (FOND) MP A FT E A= [0 0 0 0 **20**] B= [0 0 0 0 **20**] B-A= [0 0 0 0 0]	MP A FT E Agriculture A= [13 0 1.34 5] B= [0 10 0 2] Generation d"énergie A= [13 0 1,34 **0**] B= [0 0 0 **5**] B-A= [-13 10 -1.34 -3] [-13 0 -1.34 5]

Source : L'auteur

XIII.E : Indicateur d'économie circulaire

Indicateur de circularité de Yifang *CL* (%)

Deuxième variation : Incinération du déchet

Input

	travail	énergie	alim	capital var	capital fixe	déchet
menage	3,663	1,181	0,000	0,000	0,000	0,000
prod.énergie	0,500	0,000	0,000	0,513	0,000	0,000
agricult	0,093	0,000	0,000	0,006	0,000	0,000
met urb	2,850	1,279	2,154	0,922	0,000	0,000
entretien ca	0,100	0,000	0,000	0,000	0,800	0,000
incineration	0,120	0,000	0,000	0,006	0,800	1,100

Output

	travail	énergie	alim	capital var	capital fixe	déchet
menage	3,663	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
prod.énergie	0,000	1,482	0,000	0,000	0,000	0,000
agricult	0,000	0,000	2,154	1,000	0,000	0,000
met urb	0,000	0,000	0,000	1,400	0,000	1,100
entretien ca	0,000	0,000	0,000	0,000	0,800	0,000
incineration	0,000	0,988	0,000	0,513	0,000	0,000

Nous avons utilisé le prix montrés dans le deuxième vecteur de prix (annexe XIII.C, Tableau XIII.C.4: Incinération des déchets **g=50%**)

$$P_1 = -0.44 \quad P_2 = -0.30 \quad P_3 = 0.27 \quad P_4 = -0.62 \quad P_5 = -0.25 \quad P_6 = -0.45 \quad OTE = output.total.énergie$$

$$\alpha = \frac{1.1}{1.1} = 1 \quad \beta = \frac{0.988}{1.279} * \frac{-0.3}{-0.3} \quad cl = \alpha * \beta = 77.2\%$$

$$\Sigma_{i=1}^{6} OTE_i * p_2 * cl = (0 * p_2 * 0.77) + (1.482 * p_2 * 0.77) + (0 * p_2 * 0.77) + (0 * p_2 * 0.77)$$
$$+ (0 * p_2 * 0.77) + (0.988 * p_2 * 0.77) = -0.57$$

$$CL.énergie = \frac{\Sigma_{i=1}^{6} OTE_i * p_2 * cl}{3.7 * p_1 + 0.5 * p_1 + 0.1 * p_1 + 2.9 * p_1 + 0.1 * p_1 + 0.1 * p_1} == 19\%$$

Troisième variation : Compostage du déchet urbain

Input

	travail	énergie	alim	cap	compost	déchet
menage	3,7	1,2	0,0	0,0	0,0	0,0
prod.énergi	0,5	0,0	0,0	0,5	0,0	0,0
agricult	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
met urb	2,9	1,3	2,2	0,9	0,0	0,0
agriurb	0,1	0,0	0,0	0,0	0,4	0,0
compostage	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,4

Output

	travail	énergie	alim	cap	compost	déchet
menage	3,7	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
prod.énergi	0,0	1,5	0,0	0,0	0,0	0,0
agricult	0,0	0,0	1,5	1,0	0,0	0,0
met urb	0,0	0,0	0,0	1,4	0,0	1,1
agriurb	0,0	0,0	0,7	0,2	0,0	0,0
compostage	0,0	0,0	0,0	0,0	0,4	0,0

Nous avons utilisé le prix montrés dans le troisième vecteur de prix (annexe XIII.C, Tableau XIII.C.7: Compostage des déchets urbain **g=50%**)

$$P_1 = 0.04 \quad P_2 = -0.24 \quad P_3 = -0.44 \quad P_4 = 0.65 \quad P_5 = -0.38 \quad P_6 = -0.32 \quad OTM = output.total.matière$$

$$\alpha_1 = \frac{0.4}{1.1} = 0.37 \quad \beta_1 = \frac{0.4}{0.4} * \frac{0.38}{0.38} \quad cl = \alpha * \beta = 37.2\%$$

$$\Sigma_{i=1}^{6} OTM_i * p_2 * cl = (0 * p_5 * 0.37) + (0 * p_5 * 0.37) + (0 * p_5 * 0.37) + (3 * p_5 * 0.37)$$
$$+ (0 * p_5 * 0.37) + (0 * p_5 * 0.37) = 0.056$$

$$CL.matière = \frac{\Sigma_{i=1}^{6} OTM_i * p_2 * cl}{3.7 * p_1 + 0.5 * p_1 + 0.1 * p_1 + 2.9 * p_1 + 0.1 * p_1 + 0.1 * p_1} == 24\%$$

Indicateurs de circularité de la Fondation Ellen MacArthur.

Deuxième variation : Incinération du déchet

Input

	travail	énergie	alim	capital var	capital fixe	déchet
menage	3,663	1,181	0,000	0,000	0,000	0,000
prod.énergie	0,500	0,000	0,000	0,513	0,000	0,000
agricult	0,093	0,000	0,000	0,006	0,000	0,000
met urb	2,850	1,279	2,154	0,922	0,000	0,000
entretien ca	0,100	0,000	0,000	0,000	0,800	0,000
incineration	0,120	0,000	0,000	0,006	0,800	1,100

Output

	travail	énergie	alim	capital var	capital fixe	déchet
	3,663	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
	0,000	1,482	0,000	0,000	0,000	0,000
	0,000	0,000	2,154	1,000	0,000	0,000
	0,000	0,000	0,000	1,400	0,000	1,100
	0,000	0,000	0,000	0,000	0,800	0,000
	0,000	0,988	0,000	0,513	0,000	0,000

$M = input.au.début = énergie \qquad X = taux.de.profit = 0.9$

$ratio.valorisation(Fr) = 0.988/1.279 \qquad ratiodéchetcollecté(Cr) = \frac{1.1}{1.1} = 1 \qquad V = M(1-Fr)$

$Ec = Ef = 0.26(\text{Pr}evot, 2000)$

$Wo = M(1-Cr) = 0 \qquad Wc = M(1-Ec)Cr = 0 \qquad Wf = M(\frac{(1-Ef)Fr}{Ef}) = 2.81 \qquad W = Wo + \frac{Wf + Wc}{2} = 1.40$

$LFI(Indicateur.flux.lineal) = \frac{(V+W)}{(2*M + \frac{(Wf - Wc)}{2})} = 0.42 \qquad Indic.flux.circ.énergie(MCI) = (1 - LFI * X) = 0.61$

Troisième variation : Compostage du déchet urbain

Input

	travail	énergie	alim	cap	compost	déchet
menage	3,7	1,2	0,0	0,0	0,0	0,0
prod.énergie	0,5	0,0	0,0	0,5	0,0	0,0
agricult	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
met urb	2,9	1,3	2,2	0,9	0,0	0,0
agriurb	0,1	0,0	0,0	0,0	0,4	0,0
compostage	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,4

Output

	travail	énergie	alim	cap	compost	déchet
	3,7	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	0,0	1,5	0,0	0,0	0,0	0,0
	0,0	0,0	1,5	1,0	0,0	0,0
	0,0	0,0	0,0	1,4	0,0	1,1
	0,0	0,0	0,7	0,2	0,0	0,0
	0,0	0,0	0,0	0,0	0,4	0,0

$M = input.au.début = compost \qquad X = taux.de.profit = 0.9$

$ratio.compostage(Fr) = 0.4/0.4 \qquad ratiodéchetcollecté(Cr) = \frac{0.4}{1.1} = 0.37 \qquad V = M(1-Fr)$

$Ec = Ef = 0.77(Vasquezetal, 2017)$

$Wo = M(1-Cr) = 0.25 \qquad Wc = M(1-Ec)Cr = 0 \qquad Wf = M(\frac{(1-Ef)Fr}{Ef}) = 0.119 \qquad W = Wo + \frac{Wf + Wc}{2} = 0.31$

$LFI(Indicateur.flux.lineal) = \frac{(V+W)}{(2*M + \frac{(Wf - Wc)}{2})} = 0.36 \qquad Indic.flux.circ.matière(MCI) = (1 - LFI * X) = 0.67$

BIBLIOGRAPHIE

Abraham-Frois, G., Berrebi, E. (1979). A propos d'une incohérence logique de P. Sraffa. *Cahiers d'économie politique*, 5 (1), pp. 5-10

Abraham-Frois, G. (1992) . *Economie politique*, 5e édition.

Abraham-Frois, G. (2001). Une première application du théorème de Perron-Frobenius à l'économie : l'abbé Potron comme précurseur. *Revue d'économie politique*, 3.

Abrahams, N. A., Hubbell, B. J., Jordan, J. L. (2000). Joint Production and Averting Expenditure Measures of Willingness to Pay: Do Water Expenditures Really Measure Avoidance Costs? *American Journal of Agricultural Economics*, 82(2), pp. 427-437.

ADEME (2007a). *Bilan Carbone® Entreprises et collectivités. Guide méthodologique, version 5. Objectifs et principes de comptabilisation.*

ADEME (2007b). *Etat de l'art de la réglementation européenne sur la valorisation des déchets de bois et des cendres de bois.*

ADEME (2009). *La collecte des déchets par le service public en France. Synthèse Année 2009.*

ADEME (2010a). *Tableau de bord de l'énergie en Ile-de-France.* Edition 2010 consommation et production d'énergie.

ADEME (2010b). *Bilan Carbone® Entreprises et collectivités. Guide des facteurs d'émissions, version 6.1*

ADEME (2010c). *Mieux gérer les déchets de chantier de bâtiment.* FFB. Fédération Française du Bâtiment.

ADEME (2011). *Enquête sur les prix de l'incinération des déchets municipaux.*

ADEME (2012). *Gestion et valorisation des déchets de construction.*

ADEME (2013a). *Collecte et analyse d'informations sur les exemples, méthodes et outils de prévention des déchets en entreprises et rédaction de supports de diffusion. Rapport final*

ADEME (2013b). *Réduire, trier et valoriser les biodéchets des gros producteurs. Guide pratique*

ADEME (2014a). *Déchets édition 2014. Chiffres clés.*

ADEME(2014b). *Guide méthodologique du développement des stratégies régionales d'économie circulaire en France.*

ADEME (2014c). *Textiles d'habillement, linge de maison et chaussures des ménages.*

ADEME (2014d). *VALORMAT : recyclage des matelas usagés et incorporation des matières recyclées dans des applications à haute valeur ajoutée.*

ADEME (2015). *Evaluation du gisement du déchets bois et son positionnement dans la filière bois/bois énergie*

ADEME-IPSOS (2014). *L'émergence des pratiques " co " en France : vers un nouveau modèle social ?*

Aglietta, M., Orléan, A. (2002). *La monnai entre la voilence et confiance.*

Agreste (2014). *Données Ile-de-France.N°109.* URL: http://www.ile-de-france.chambagri.fr/rep-agriculture/110914_donnees_agreste_IDF_RGA_2010.pdf

Akhabbar, A., Lallement, J. (2010). *Wassily Leontief and Léon Walras: the Production as a Circular Flow.*

Akhabbar, A., Lallement, J. (2011). *Des coefficients de fabrication de Walras aux coefficients techniques de Leontief : quelques remarques épistémologiques.*

Araghi, F. (2009). *Labor in nature: food, ecology, and the crisis of global value relations.* Paper presented to the conference, 'Food, Energy, Environment', Fernand Braudel Center, Binghamton University, 9-10 October.

Archaimbault, V. (2010). L'indice biologique global normalisé (IBGN), principes et évolution das le cadre de la directive européenne sur l'eau. *Sciences Eaux et Territoires.N°1*

Armand, T. (2011) *Empreinte écologique pour le Parc Naturel Régional de la Haute Vallée de Chevreuse.* Présentation Moulin d'Ors 30 juin 2011.

Arnsperger, C., Bourg, D. (2016).Vers une économie authentiquement circulaire. Réflexions sur les fondements d'un indicateur de circularité. *Revue de l'OFCE. 2016/1 (N° 145).* DOI : 10.3917/reof.145.0091

Arp, H.P., Morin, N.A., Hale, S.E., Okkenhaug, G., Breivik, K., Sparrevik, M. (2017). The mass flow and proposed management of bisphenol A in selected Norwegian waste streams. *Waste Management.* 2017 Feb ;60, pp. 775-785. doi: 10.1016/j.wasman.2017.01.002. Epub 2017 Jan 13.

Arrighi G. (1994). *The Long Twentieth Century. Money, Power, and the Origins of our Time,* Verso, Londres.

Arrighi G. (2009). *Adam Smith in Beijing. Lineages of the 21st Century,* Verso, Londres.

Ascher, F. (2001). *Les nouveaux principes de l'urbanisme. La fin des villes n'est pas à l'ordre du jour.* Éditions de l'Aube, La Tour d'Aigues.

Aspromourgos, T. (2004). Sraffian Research Programmes Unorthodox Economics. *Review of Political Economy,* 16(2).

Atlan, H. (1972). *L'organisation biologique et la théorie de l'information.* Hermann, Paris, réédition en 1992; Seuil, 2006.

Audrain, J., Guyonnaud, M-F (2011). *L'empreinte environnementale appliquée sur des territoires.* Editions T.I.

Audrain, J., Cordier, M., Faucheux, S.,O'Connor, M.(2012). La ville et son estuaire: écologie territoriale et indicateurs pour un développement durable de la métropole parisienne. *Cahier REEDS 2012-02.*

Ayres, R.U., Kneese, A.V. (1969). Production, consumption, and externalities. *The American Economic Review ,* 59, pp. 282-297.

Ayres, R. U. (1978). *Resources, Environment, and Economics: Applications of the Materials/Energy Balance Principle*. New York: Wiley Interscience,

Ayres R. U., Kneese A. V. (1989). *Externalities: economic and thermodynamics , in Archibugi F. et Nijkamp P., Economy and Ecology : Towards Sustainable Development* , Kluwer, Boston, pp. 89-118.

Ayres, R. U, Simonis, U.E. (1994). *Industrial Metabolism: Restructuring for Sustainable Develo*pment. United Nations University Press, Tokyo, 1994, pp. 376

Ayres, R. U. (1998). The second Law, the fourth law, recycling and limits to growth , *Working Paper Series,n° 98/38/EPS,* Centre for the Management of Environmental Resources, INSEAD, Fontainebleau, France.

Ayres, R. U. (1999). *The second law, the fourth law, recycling and limits to growth*, 29(3), pp. 473-483.

Backhaus, C. (2012). *Coal Mine Methane - New Solutions for Use of CMM - Reduction of GHG Emissions.*

Balibar, É., Balibar, S. (2009). *Demain, la physique*, pp. 264-265

Barbir, F., Ulgiati, S. (2007). *Sustainable Energy Production and Consumption: Benefits, Strategies and environmental costing*. Published by Springer. pp. 125-127.

Barles, S. (2004). *La nature indésirable : L'animal, ressource et nuisance urbains, Paris, XIXe siècle,* communication à la 3e table ronde d'histoire de l'environnement urbain (XIXe-XXe siècle) The Making of European Contemporary Cities: an Environmental History, Sienne, 24-27 juin 2004.

Barles, S. (2007). *Mesurer la performance écologique des villes et des territoires : Le métabolisme de Paris et de Ile-de-France.*

Baroni, M. (2006). *Etude des anomalies isotopiques du soufre et de l'oxygène dans le sulfate d'origine volcanique enregistré dans les archives glaciaires*. Thèse Université Joseph Fourrier-CNRS.

Baumgartner, S. (1999). *Ambivalent Joint Production and the Natural Environment*. An Economic and Thermodynamic Analysis Series.

Baumgartner, S., Jost, F. (2000). Joint Production, Externalities, and the Regulation of Production Networks. *Environmental and Resource Economics,* 16, pp. 229-251.

Baumgartner, S. (2001). Heinrich Von Stackelberg on joint production. Euro. *Journal History of Economic Thought,* 8(4), pp. 509-525.

Baumgartner, S., Dyckhoff, H., Faber, M., Proops, J., & Schiller, J. (2001). The concept of joint production and ecological economics. *Ecological Economics,* 36(3), pp. 365-372.

Baumgartner, S. (2004). Price ambivalence of secondary resources: joint production, limits to substitution, and costly disposal. *Resources, Conservation and Recycling*, 43(1), pp. 95-117.

Baumgartner. S. (2005). *Temporal and thermodynamic irreversibility in production theory*, pp. 725-728.

Bellamy Foster, J., Burkett, P. (2004). *A Critical Essay : Ecological Economics and Classical Marxism. The "Podolinsky Business" Reconsidered.*

Bianciardi C., Tiezzi E., Ulgiati S. (1993). On the relation between the economic process, the Carnot cycle and the entropy law, *Ecological Economics,* 8, p. 7-10.

Bidard, C., Erreygers, G. (2001a). Furthers Reflection of The Corn-Huano Model. *Metroeconomica,* 52(3), pp. 254-263.

Bidard, C., Erreygers, G. (2001b). The Corn-Huano Model. *Metroeconomica,* 52(3), pp. 243-253.

Bidard, C., Erreygers, G. (2007). *The classical theory of value and exhaustible resources.*

Bigot, R, Hoibian, S. (2014). *Evolutions du comportement des français face au développement de l'économie circulaire analyse synthétique des études quantitatives portant sur les modes de vie et les aspirations de la population française.* Étude réalisée pour le compte de l'ADEME

Billen, G, Mouchet J.C. (2011). *La cascade de l'azote dans le bassin de la Seine. Comprendre les processus pour inverser les tendances.* Agence de l'eau Seine et Normandie.

Bisson, M. (2011). *Fiche de données toxicologiques et environnementales des substances chimiques. INERIS*

Bocken, N., Olivetti, E., Cullen, J.M., Potting, J., Lifset, R.(2017). Taking the Circularity to the Next Level: A Special Issue on the Circular Economy, *Journal of Industrial Ecology*, 21(3), pp . 476

Bohm-Bawerk, E. (1896). *Karl Marx and the Close of His System.*

Boltzmann, L. (1987). *Leçons sur la théorie des gaz, Jacques Gabay*, Les grands classiques Gauthier-Villars, Paris.

Bonneau, M. Dambrine, E. Aschan, C. (1992). Apport de pollution et de nutriments aux peuplements forestiers par l'atmosphère : intensité et variations dans le Massif vosgien. *Courrier de l'environnement INRA n°16*

Bortkiewicz, L. V. (1906). *Wertrechnung und Preisrechnung im Marxschen System.*

Boulding, K.E. (1973). *The Economics of the Coming Spaceship Earth. En: Toward a Steady State Economy*, DALY, H. (ed.). Freeman : San Francisco, pp. 3-14.

Bouni, C. Laurans, Y. (1989). *Eutrophisation : approche du phénomène pour une évaluation des conséquences économiques et sociales.* Mémoire pour le diplôme d'études approfondies d'analyse et d'aménagement de l'espace.

Bourg, D. (2010). *Réintroduire de la finitude dans le système économique.* La chair et la souffle, 5(2). pp 60-66.

Braudel, F. (1947). *La Méditerranée et le monde méditerranéen à l'époque de Philippe II.* (thése de mémoire).

Braudel, F. (1988). *La dynamique du capitalisme.*

Brekke, K. A. (1997a). *Economic growth and the environment: on the measurement of income and welfare.* 182.

Brekke, K. A. (1997b). The numéraire matters in cost-benefit analysis. *Journal of Public Economics,* 64(1), pp. 117-123.

Brillouin, L. (1959). *La science et la théorie de l'information*, Masson, Paris.

Burkett, P. (2009). *Marxism and Ecological Economics: Toward a Red and Green Economy* (Chicago: Haymarket, [2006] 2009), vii.

Burlat, A. (2009). *Les projets eau et assainissement au regard des extensions urbaines dans villes de pays du sud et de l'est de la mediterranée: Services publics, services essenciels ou services urbains?*

Cadillon, M., Lacassin, J.C., Belvau. E. (2002). *Réflexions sur la place du compost du déchets organiques urbains dans la mise en valeur et la maintenance de la productivité du sols sales.*

Canadell, J. Le Quéré, C. Raupach, M. Field, C. Buitenhuis, E. Ciais, P. Conway, T. Gillett, N. Houghton, R.A. Marland, G. (2007). *Contributions to accelerating atmospheric CO2 growth from economic activity, carbon intensity, and efficiency of natural sinks.* PNAS 2007.

Carnot, S. (1824). *Reflections on the Motive Power of Fire and on Machines Fitted to Develop that Power.*

Carnot, S. (1990). *Réflexions sur la puissance motrice et sur les machines propres à développer cette puissance* , Jacques Gabay, Paris.

Carpenter, E. Montoya, JP. Bunrs, J. Mulholland, M. Subramaniam, A. Capone, D. (1999). *Extensive bloom of a N,-fixing diatom/cyanobacterial association in the tropical Atlantic Ocean*, 185, pp. 273-283.

Castebrunet, H. (2007). *Soufre Atmosphérique et Changements Climatiques : une étude de modélisation pour les moyennes et hautes latitudes Sud*. Thèse Université Joseph Fourrier-CNRS

Cd2e. (2014). Projet Interreg FUSION. URL : *http://www.cd2e.com/nos-projets/interreg-fusion-economie-circulaire*

Cellier, P., Rochette, P., Faverdin, P. (2012). La cascade de l'azote et l'élevage, et ses conséquences. In: Les flux d'azote liés aux élevages. Réduire les pertes, rétablir les équilibres (p. 28-78). Expertises Scientifiques Collectives. Paris : INRA. http://prodinra.inra.fr/record/168330

Chambagri (2016). *Chiffres-clés de l'agriculture et de l'agro-alimentaire en Ile-de-France*. URL: http://www.ile-de-france.chambagri.fr/rep-agriculture/160216_chiffres_cles_IDF_2016.pdf

Chambaut, H. Bordenave, P. Durand, P.Laurent, F. Fourrié, L. (2008). *Modélisation des flux d'azote dans le bassin versant laitier de la Fontaine-du-Theil*. INRA-CEMAGREF.

Chen, J-Z. (2009). Material flow and circular economy. *Systems Research and Behavioral Science,*26(2).

Chertow, M., Ashton, W., Kuppalli, R. (2004). *The Industrial Symbiosis Research Symposium at Yale: Advancing the Study of Industry and Environment*, Yale school of forestry & environmental studies, Report n° 3, Yale Publishing Services Center, p.41.

Chocat, B. (2008). *Etat de l'art sur la gestion urbaine des eaux pluviales et leur valorisation Tendances d'évolution et technologies en développement.*

Clark, B., York, R. (2005a). Carbon metabolism. *Theory and Society*, 34, pp. 391-428.

Clark, B., York, R. (2005b). Dialectical nature. *Monthly Review*, 57(1), pp. 13-22.

Clark, B., York, R. (2008). Rifts and shifts: getting to the roots of environmental crises. *Monthly Review,* 60(6), pp. 13-24.

Clausius, R. (1991). *Théorie mécanique de la chaleur,* Jacques Gabay, blong, Paris.

Clift, R. Allwood, J. M. (2011). *Rethinking the Economy. The Chemical Engineer*, Mar 2011.

Codom, N. (2014). *Réutilisation des eaux usées traitées : l'économie circulaire appliquée au domaine de l'eau.*

Cohen, N. (2011). *Green Business: An A-to-Z Guide*

Cordier, M., Hecq, W., Lancelot, C., O'Connor, M. (2011). *Ecosystème estuarien et système économique régional: faisabilité d'une intégration par modélisation input-output, application au cas de l'habitat halieutique dans l'estuaire de la Seine.*

CORPEN(Ministère de l'agriculture et de la pêche) (2001). *Les émissions d'ammoniac d'origine Agricole dans l'atmosphère : Etat des connaissances et perspectives de réduction des émissions. Groupe de Volatilisation des composés azotés.*

COSEI (Comite strategique des eco-industries) (2011). *Développer la filière française de la valorisation industrielle des déchets. Groupe de travail " valorisation industrielle des déchets ".*

Costanza, R. (1980). Embodied energy and economic valuation. *Science,* 210, pp. 1219-1224.

Cottrell, F. (1955). *Energy and Society: The Relation between Energy, Social Change and Economic Development*. McGraw-Hill, New York, NY.

Couvet, D., Teyssèdre, A. (2010). *Ecologie et biodiversité*, belin, 336 p.

CPA SAGE – Onema. *La caractérisation des usages de l'eau*. URL : http://www.onema.fr/sites/default/files/pdf/chapitre1-2.pdf

CROCIS (Centre Régional d'Observation du Commerce, de l'Industrie et des Services) (2006). La filière agroalimentaire en Île-de-France. *Les cahiers du crocis. n°22*

Cumberland, J.H, (1966). A regional inter-industry model for the analysis of development objectives. *Papers in Regional Science Association,*17, pp. 64-94.

Daly, H.E. (1968). On Economics as a Life Science. *Journal of Political Economy*, 76(3), pp. 392-406.

Daly, H.E. (1991). *Elements of environmental macroeconomics. Ecological Economics: The Science and Management of Sustainablitiy*. R. Costanza. New York, Columbia University Press. pp 32-46.

Daly, H.E. (1992). *Steady-state economics* (2e ed), Eathscan, London.

Daly, H.E. (1997). Georgescu-Roegen versus Solow/Stiglitz. *Ecological Economics,* N 22, pp. 261-267.

Dambrine, E. (2001). *Pollution atmosphérique acide et azotée: des effets variés, des dynamiques lentes. INRA.*

Daumer, M.L. (2007). *Analyse des transformations du phosphore lors du stockage et du traitement biologique et physico-chimique des lisiers de porc en vue d'un recyclage.* Thèse Cemagref.

Déleage, J.P. (1991). *Histoire de l'écologie une science de l'homme et de la nature*. Editions La Découverte. Paris

Delmas, R., Mégie, G., Peuch, V.H. (2005). *Physique et chimie de l'atmosphère*. 2e édition

DELOITTE (2014). *Analyse de la chaine de valeur du recyclage des plastiques en France-Synthèse.*

Dmitriev, V. K. (1974). *Economic Essays on Value, Competition and Utility.*

Douguet, J.M., Noël, J.-F., O'Connor, M. (2008). Systèmes de valeurs et appropriation du Capital écologique : Modes de régulation de la ressource en eau en Bretagne. *Cahier du C3ED, 1.*

Douguet, J-M., O'Connor, M., Doussoulin, J-P., Lanceleur, P., Philippot, K. (2015). L'empreinte écologique du parc naturel de la haute vallée de chevreuse : du concept à la construction de l'outil. *Rapport de Recherche REEDS. No.2014-37*

Doussoulin, JP. (2012). *Baisse tendancielle de l'intensité énergétique de la production française. Dématérialisation ou délocalisation ?*. Mémoire de master au Centre Cired.

Doussoulin JP, Bittencourt,M. (2017). Circular economy evidence from developing countries and developed countries: Waste construction trends in Brazil and France. An Input-Output analysis. Article accepté pour le *Springer Book Series 5: circular Urban Metabolism.*

DRIAAF (Direction Régionale Interdépartementale de l'Alimentation, de l'Agriculture et de la Forêt d'Île-de-France) (2014). *Le secteur agricole et agroalimentaire en Ile-de-France.* URL: http://driaaf.ile-de-france.agriculture.gouv.fr/IMG/pdf/1683_le_contexte_agricole_et_agroalimentaire_en_Ile-de-France_Mise_en_page_1_cle44b616-1_cle8837d6.pdf

DRIEA (Direction régionale et interdépartementale de l'équipement et de l'aménagement d'Île-de-France) (2012). Documents d'orientation stratégiques pour le fret en Ile-de-France à l'horizon 2025.

Duchin, F., Lange G.M. (1995). *The Future of the Environment: Ecological Economics and Technological Change.*

Dupuy, R., Roman, Ph., Mougenot, B. (2015). Analyzing Socio-Environmental Conflicts with a Commonsian Transactional Framework: Application to a Mining Conflict in Peru. *Journal of Economic Issues Volume 49, Issue 4*

Eigen, M., Schuster, P. (1978). *The Hipercycle. A Principe of Natural Self-Organization.* pp. 7-41.

El korchi, A. (2008). *Conditions stratégiques d'émergence d'une reverse supply chain à des fins de remanufacturing chez le fabricant d'origine.* Thèse présentée et soutenue publiquement pour l'obtention du doctorat en sciences de gestion. Université de la mediterranee - Aix-Marseille II.

Ellen MacArthur Foundation. (2010). *Circularity indicators. An approach to measuring the Circularity.*

Ellen MacArthur Foundation (2013). *Towards the circular economy. Economic and business rationale for an accelerated transition.* URL: https://www.ellenmacarthurfoundation.org/assets/downloads/publications/Ellen-MacArthur-Foundation-Towards-the-Circular-Economy-vol.1.pdf

Ellen MacArthur Foundation (2016). *L'économie circulaire, pour une Europe compétitive.* URL: https://www.ellenmacarthurfoundation.org/fr/publications-1

Entholzner, A., Reeve, C. (2016). *Building Climate Resilience through Virtual Water and Nexus Thinking in the Southern African Development Community.* Springer Water.

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*, Volume 69, Issue 2, pp. 250-259.

Erreygers, G. (1989). On Indirect Taxation and Weakly Basic Commodities. *Journal of Economics*, 50(2), pp. 139-156.

Erreygers, G. (1990). *Terre, rente et choix techniques. Une étude sur la Théorie néo-ricardienne* Thèse présentée et soutenue publiquement pour l'obtention du doctorat en sciences économiques. Université Paris X -Nanterre. pp. 78-79

Esculier, F.(2016). *L'empreinte azote dans nos modes de vie.*

European Commission (2014). *Scoping study to identify potential circular economy actions, priority sectors, material flows and value chains.*

European Environmental Agency (EEA) (2012). *Environmental indicator report 2012.*

European Sustainable Phosphorus Platform Scope (2014). *NewsLetter n°105.*

Faucheux, S., Pearce, D., Proops, J. (1996). *Models of Sustainable Development*, pp. 321-344. Cheltenham: Edward Elgar.

Ferlay, A (2009). *La supplémentation en lin modifie plus largement la composition en acides gras du lait que les antioxydants, la race ou l'heure de traite, et elle diminue les émissions de méthane des vaches laitières.* INRA Clermont Ferrand.

Fischer-Kowalski M. (1998). Society's Metabolism: The Intellectual History of Material Flow Analysis Part I, 1860-1970. *Journal of Industrial Ecology* , 2(1), pp. 61-78.

Fischer-Kowalski M., Haberl H. (2007). *Socioecological Transitions and Global Change: Trajectories of Social Metabolism and Land Use*, Cheltenham, Edward Elgar.

Fischer-Kowalski M., Swilling M. (2011). D*ecoupling natural resource use and environmental impacts from economic growth, A Report of the Working Group on Decoupling to the International Resource Panel*, Nairobi, Programme des Nations-Unies pour l'Environnement.

Foster, J.B. (1992). The absolute general law of environmental degradation under capitalism. *Capitalism Nature Socialism*, 3(2), pp. 77-96.

Foster, J.B. (1994). The vulnerable planet. New York: *Monthly Review Press.*

Foster, J.B. (1999). Marx's theory of metabolic rift. *American Journal of Sociology*, 105(2), pp. 366-405.

Foster, J.B. (2000). Marx's ecology. New York: *Monthly Review Press.*

Foster, J.B. (2001). Environmental politics: analyses and alternatives. *Historical Materialism*, 8, pp. 461-77.

Foster, J-B., Clark, B., York, R. (2010). The Ecological Rift (New York: *Monthly Review Press*).

Friedlingstein, P., Bopp, L., Cadule, P.(2007). Changement climatique et cycle du carbone. *La Météorologie*,58,pp.27.URL: www.researchgate.net/publication/27612922_Changement_climatique_et_cycle_du_carbone

Galbraith, J-K., (1958). *The Affluent Society.*

Georgescu-Roegen, N. (1969). *Process in farming vs. process in manufacturing: A problem of balanced development*. In U. Papi and C. Nunn (Eds.), Economic problems of agriculture in Industrial Societies, pp. London: MacMillan. . 497-533

Georgescu-Roegen, N. (1970). The economics of production. *American Economic Review* 60 (2), pp. 1-9.

Georgescu-Roegen, N. (1971). *The Entropy Law and the Economic Process*. Cambridge, Massachusetts: Harvard University Press.

Georgescu-Roegen N. (1975). Energy and economic myths. *South Economy Journal,* 41(3), pp. 347-81.

Giampietro, M., Mayumi, K., (2000a). Multiple-scale integrated assessment of societal metabolism: introducing the approach. *Population and Environment* 22 (2), pp. 109-153.

Giampietro, M., Mayumi, K., (2000b). Multiple-scale integrated assessments of societal metabolism: integrating biophysical and economic representations across scales. *Population and Environment* 22 (2), pp. 155-210.

Gibbs, W. (1873). The Scientific Papers of J. Willard Gibbs, *Vol. I Thermodynamics.*

GIEC, (2007) : *4e rapport du GIEC*

Glennie, EB. Littlejohn, C. Gendebien, A. Hayes,A Palfrey,R. Sivil, D. Wright,K (2002). *Phosphates and alternative detergent builders - Final Report.* EU Environment Directorate.

GRI (Global Reporting Initiative) (2013). *G4 Sustainability Reporting Guidelines. Reporting Principles and Standard Disclosures.*

Gubanov, V. G., Degermendzhy, A. G. (2008). *Biotic Turnover in Superorganism Systems : Several Principles of Establishment and Sustenance*. In : Biosphere origin and evolution, Springer editions, 2008.

Guidano, V. (1991). *The Self in Process,* Guilford, New York.

Gutowski, T. Allwood, J. Herrmann, C. Sahni, S. (2013). A Global *Assessment of Manufacturing: Economic Development, Energy Use, Carbon Emissions, and the Potential for Energy Efficiency and Materials Recycling*. 38, pp. 81-106.

Haake, J. (2001). *Les strategies des enterprises pour une utilisation des matieres plus respectueuse de l'environnement.* Thése UVSQ-REEDS.

Hafiane, M., Hamzaoui, D., Bouchelouche, D., Mebarki, M., Arab, A. (2013). *Application de l'I.B.G.N et du B.M.W.P' sur un oued temporaire d'Algérie*. 4th International Congress of the Populations

& Animal Communities "Dynamics & Biodiversity of the terrestrial & aquatic Ecosystems""CIPCA4"TAGHIT (Bechar) - ALGERIA, 1921 November, 2013

Haila, Y. and L. Heininen. (1995). Ecology: a new discipline for disciplining? *Social Text*, 42, pp. 153-71.

Hamaoui-Laguel, L (2012). *Les Emissions d'Ammoniac par les Activités Agricoles : Impact sur la qualité de l'Air*. Thèse à l'université Paris. Diderot (Paris 7)

Hardin, G. (1968). *The Tragedy of the Commons.*

Harper, D. (1992). *Eutrophication of Freshwaters*, Chapman and Hall, London.

Hartwick, J. M. (1977). *Intergenerational Equity and the Investing of Rents from Exhaustible Resources.*

Harvey, D. (1982). *The limits to capital*. New York: Verso.

Harvey, D. (1989). *The condition of postmodernity*. Oxford: Basil Blackwell.

Heinberg, R. (2003). *The party's over: peak oil and the fate of industrial societies*. Gabriola Island: New Society Press.

Hoekstra, A.Y., Hung, P.Q. (2002) . A quantification of virtual water flows between nations in relation to international crop trade, *Value of Water Research Report Series* No. 11, UNESCO-IHE Institute for Water Education, Delft, the Netherlands.

Hoekstra, A.Y ., Chapagain, A.K., Aldaya, M.,Mekonnen, M. (2011). *The Water Footprint Assesment Manual: Satting the Global Standard.*

Hoekstra, R., C.j.m. van den bergh., J. (2006). Constructing physical inputoutput tables for environmental modeling and accounting: Framework and illustrations, *Ecological Economic*s, 59, pp.375-393.

Hoekstra, R., Delahaye, R., van den Tillaart, J., Dingena, G. (2015). Expanding the Material Flow Monitor A feasibility study on the concepts and data needed to create an integrated measurement system for the circular economy, bio-based economy, eco-taxation and other resource issues. *Discussion Paper N°15.*

Hubacek, K., Giljum, S. (2003). Applying physical input-output analysis to estimate land appropriation (ecological footprints) of international trade activities. *Ecological Economics*, 44(1), pp. 137-151.

Hughes, J.D. (1994). *Pan's travail*. Baltimore: Johns Hopkins University Press.

Hughes, J.D. (2006). *What is environmental history ?* Cambridge: Polity Press.

IAU (2013). *Economie circulaire, écologie industrielle.*

IAU (2015). *Les filières courtes de proximité au sein du système alimentaire francilien. Les acteurs et les grandes filières du système alimentaire francilien.*

IAU., Insee., CCI Paris Ile-de-France. (2016). *Chiffres clés de la région d'Ile-de-France 2016.*

ICOP Projet de recherche ANR JCJC-606-01, initié par E. Bucciarelli du LEMAR avec le soutien de l'UBO, le CNRS, l'IRD et l'IFREMER.

IFEN (2005). *Amélioration contrastée de la qualité de l'air des villes entre 2000 et 2005.*

INRIS (2011). *Caractérisation des concentrations en hydrogène sulfuré et autres composés soufrés sur la plage de la baie de Morieux (22) et à l'embouchure du Gouessant.*

Insee(2012). Les salaires dans les régions en 2012 Peu d'écarts en dehors de l'Île-de-France. *Insee Première* N°1623

Insee (2017). L'emploi salarié du commerce de détail tiré par le commerce alimentaire. *Insee Focus N°84*

Institut de la statistique du québec (2011). *Revue de la littérature sur les comptes des matières résiduelles solides. pp. 39-41*

IPCC (2001). *Third Assessment Report: Climate Change (TAR). Working Group I: The Scientific Basis.*

IPCC (2013). *Working Group I: The Scientific Basis*

Isard W. (1968). On the linkage of socio-economic and ecological system. *Papers of the Regional Science Association* ,21, pp.79-99

Ivry94. (2016). *Journal municipal d'informations locales*, n°477

Johansen, L. (1960). *A Multi-Sectoral Study of Economic Growth*, North-Holland (2nd enlarged edition 1974).

Joos. E (2005). *Pluies acides vingt ans après : Le point de vue d'EDF.*

Jorgensen, S.E. (1997). *Integration of ecosystem theory: a pattern.* Kluwer academic Publisher , Dordrecht.

Kåberger T., Månsson B. (2001). Entropy and economic processes - physics perspectives, *Ecological Economics,* 36, pp. 165-179

Kleinod, M. (2017). *The Recreational Frontier Ecotourism in Laos as Ecorational Instrumentality.* Universitätsverlag Göttingen. URL: https://www.univerlag.uni-goettingen.de/handle/3/isbn-978-3-86395-246-4

Koopmans, T. C. (1951). *Analysis of Production as an Efficient Combination of Activities.*

Krutilla, J. V., Bowes, M. D., Sherman, P. (1983). Watershed Management For Joint Production Of Water And Timber: A Provisional Assesment. JAWRA *Journal of the American Water Resources Association*, 19(3), pp. 403-414.

Kummel , R.(1994). Recycling of matter: Energy, entropy - economy, ecology. *Ecological Economics*, 9(3), pp. 194-196

Kurz, H. D. (2006). The agents of production are the commodities themselves: On the classical theory of production, distribution and value. *Structural Change and Economic Dynamics*, 17(1), pp. 1-26.

Kurz, H.D. Salvadori, N. (2003). Fund-flow versus flow-flow in production theory: Reflections on Georgescu-Roegen's contribution. *Journal of Economic Behavior & Org*, 51, pp. 487-505

La federation des entreprises d'insertion île-de-France (2015). *Les entreprises d'insertion de l'économie circulaire en île-de-France.*

Lager, C. (2001). Joint Production with 'Restricted Free Disposal. *Metroeconomica*, 52(1), pp. 49-78.

Lagrée, P.Y. (2013). *Rappels de "thermodynamique des processus irréversibles"* (pdf) cours ENSTA,

Lallement, J .(1993). *Nouvelle historie de la pensée économique vol n°2*

Lambert, F.M. Rohfritsch, S (2013). *Rapport d'information -Assemble nationale. Etat des lieux de la biomasse. Quel approvisionnement pour la méthanisation ?*

Le Courrier de l'UNESCO.(1999). Eau douce, à quel prix ? *Numéro spécial, n°2*, février

Leach, G. (1976). *Energy and Food Production. I.P.C.* Science and Technology Press limited, Surrey, U.K.

Leakey, R.E., R. Lewin. (1995). *The sixth extinction.* New York: Anchor.

Leonard, J. *Sraffa à propos de la théorie du Capital.* URL: https://www.u-picardie.fr/curapp-revues/root/1/leonard.pdf

Leontief, W. (1936). Quantitative Input and Output Relations in the Economic System of the United States. *Review of Economics and Statistics* , 18, pp. 105-125.

Levin, S.A. (2015). Foreword: What mathematics can do for sustainability. *Bulletin of Mathematical Biology: Special Issue on Sustainability* , 77, pp. 251-253.

Levin, S.A. (1998). Ecosystems and the biosphere as complex adaptive systems. *Ecosystems* 1, pp. 431-436.

Lévy, J.C. (2009). *L'économie circulaire : l'urgence écologique ?*

Li, S. (2012). The Research on Quantitative Evaluation of Circular Economy Based on Waste Input-Output Analysis. *Procedia Environmental Sciences*, 12, pp. 65-71.

Liedtke, C., Bienge,K., Wiesen,K., Teubler,J., Greiff,K., Lettenmeier,M., Rohn,H. (2014). Resource Use in the Production and Consumption System-The MIPS Approach. *Resources*, 3(3), pp. 544-574 ; doi:10.3390/resources3030544

Liwarska-Bizukojc, E., Bizukojc, M., Marcinkowski, A.(2009). The conceptual model of an eco-industrial park based upon ecological relationships. *Journal of Cleaner Production*, 17(8), pp. 732-741

Loiret, R.(2009). *L'Empreinte Écologique des collectivités françaises, premiers résultats d'une application à la France de la méthodologie REAP du Stockholm Environment Institute.*

Loiret, R. (2012). Cahier de recherche n°1 : Rendre compte de la biodiversité dans le Bilan des relations homme-nature. Partie I : La " Biosphère" selon Vernadsky. Contradiction du principe de Carnot. Référence Centre international REEDS: *Cahier REEDS (CR)* No. 2012-04. URL: http://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00911684

Loiret, R. (2013). L'indice Ka de distance à l'équilibre et la diversité biologique. Référence Centre international REEDS:*Cahier REEDS (CR)* No. 2013-04. URL: https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01025400/document

Loiret, R. (2016). *Le bilan écologique : Mesurer la perturbation anthropogénique de l'Ecosphère et de la Biosphère (Un Bilan de l'Anthropocène) - Caractériser les voies du développement ´écologique des territoires. Biodiversité.* Thèse à l'Université Paris-Saclay, 2016.

Lotka, A.J. (1921). *Note on Moving Equilibra.* Proc Natl Acad Sci USA; 7(6), pp. 168–172. URL: https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC1084818/

Lotka, A.J. (1925). *Elements of Physical Biology.* Williams and Wilkins company, Baltimore. URL: https://archive.org/details/elementsofphysic017171mbp

Lotka, A.J. (1956). *Elements of mathematical biology.* New York: Dover.

Loubet, B (2000). *Short-range dispersion and deposition of atmospheric ammonia*, PhD thesis, UMR EGC, 78850 Thiverval-Grignon, INRA-France

Lowe, E. (1997) .Creating by-product resource exchanges: Strategies for eco-industrial parks. *Journal of Cleaner Production.* 5(1-2).

Lynk, E. L. (1993). Privatisation, joint production and the comparative efficiencies of private and public ownership: the UK water industry case. *Fiscal Studies*, 14(2), pp. 98-116.

Mama, D (2010). *Methodologie et resultats du diagnostic de l'eutrophisation du lac Nokoue (Benin).* These à l'Universite de Limoges.

Manas, A., Sperandio, M ., Rodiere, S. (2011). *Amobilisation du phosphore dans un procédé de granulation aérobie.* LISBP-INSA-Toulouse. URL : https://phosph-or2014.irstea.fr/wp-content/uploads/2015/04/4-MANAS_RODIERE_Sperandio_Granulation2.pdf

Marcuse, H. (1968). *L'homme unidimensionnel.* Editions de Minuit.

Mandel, E. (1975). *Initiation à la théorie économique marxiste.*
URL : http://www.ernestmandel.org/new/

Marchais, C (2011). *Etat des lieux de la filière méthanisation en France.* L'ATEE. URL : http://atee.fr/biogaz/etat-des-lieux-de-la-fili%C3%A8re-m%C3%A9thanisation-en-france

Margulis, L., Schwartz, K. (1987). *Life of Earth: Five Kingdoms (Introduction, Monera, Fungi, Plants).* Ward´s Nature Science Establishment, Rochester, NY.

Marie de Paris (2015). *Livre Blanc de l'économie circulaire du Grand Paris* réalisé par Deloitte.

Marioli, T. (2006). *A Critique of the `New Approach' to the Transformation Problem and a Proposal.*

Martin, E. (2011). *État de l'art : Modéliser les inefficacités de l'exploitation privée des ressources en eau souterraine ?*

Martínez Alier, J., Schüpmann, K. (1987). *Ecological Economics: Energy, Environment and Society.* Basil Blackwell, Oxford.

Martinez Alier, J. (1998). Curso de economía ecológica. Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente Oficina Regional para América Latina y el Caribe (PNUMA). *Serie Textos Básicos para la Formación Ambiental Nº 1.*

Marx, K. (1865). *Salaires, prix et profits.* Collection les cahiers Karl Marx 2010. Entremonde, pp. 48-49. URL: https://entremonde.net/IMG/pdf/CAHIERS02-Livre.pdf

Marx, K. (1867). *Das Kapital, Kritik der politischen Okonomie.*

Maturana, H., Varela, F., Urive, R. (1974). Autopoiesis: the organization of living systems, its characterization and a mode, *Biosystems*, 5(4), pp.187-196.

Maturana, H., Varela, F. (1980). *Autopoiesis and Cognition: The realization of The Living*, D. Reidel Publishing Company

Maturana, H., Varela, F. (1987). *The Tree of Knowledge.* Shambhala, Boston; trad.fr. L'Arbre de la Connaissance, Addision-Wesley, Paris, 1994.

Mayumi, K., Giampietro, M., Godwy, J.M.(1997). Solow, R. M. Georgescu-Roegen versus Solow/Stiglitz. *Ecological Economics*, 22, pp. 267-268.

McClare, C.W.F. (1971). Chemical machines, Maxwell's demon and living organisms. J. *Theor. Biol.* 30, pp. 1-34

McComb, A.J.(1995). *Eutrophic Shallow Estuaries and Lagoons*, CRC Press, Boca Raton, FL.

McDonald, G. (2005). *Integrating economics and ecology : a systems approach to sustainability in the Auckland region.* PhD Thesis, Massey University, Palmerston North, New Zealand. p. 597

McDonald, G., Patterson, M. (2008). Auckland Economy and its Interactions with the Environment: Insights form Input-Output Analysis. *NZCEE Reserach Monograph Series*, 10.

McDonald, G. (2013). *A didactic Input-Output model for territorial ecology.* hal.archives-ouvertes. URL: https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00911640

McDonough W., Braungart M. (2008). Cradle to Cradle: Remaking the Way We Make things

MEDDE (Ministère de l'écologie, du développement durable, des transports et du logement)(2012). *Circulaire du 10 janvier 2012 relative aux modalités d'application de l'obligation de tri à la source des biodéchets par les gros producteurs* (article L 541-21-1 du code de l'environnement)

MEDDE (Ministère de l'Écologie, du Développement durable et de l'Énergie)(2013). *Guide du système communautaire de management environnemental et d'audit, EMAS, pour les établissements de santé.*

MEDDE (Ministère de l'Écologie, du Développement durable et de l'Énergie) (2014). *Rapport 2011 sur les mouvements transfrontaliers du déchets dans le cadre du règlement (CE) n° 1013/2006 du Parlement européen et du Conseil et de la Convention de Bâle.* Document de travail n° 17

Metz, B. Davidson, O. De Coninck, H. Loos, M. Meye, L. (2005) *Rapport spécial du GIEC : Piégeage et stockage du dioxyde de carbone.* Rapport du Groupe de travail III du GIEC.

Miller, R.E., Blair, P.D., (2009). *Input-output Analysis. Foundations and Extensions.* Cambridge University press (Ed.), United-Kingdom, 750 pp.

Molle, P (2012). *Déphosphatation des eaux usées par filtres plantés garnis de phosphorites.* IRSTEA.

Monbiot, G. (2006). *Heat.* London. URL: http://www.monbiot.com/books/heat/

Moody, K. (1997). *Workers in a lean world: unions in the international economy.* London: Verso.

Moore, J.W. (2000). *Environmental crises and the metabolic rift in world-historical perspective.* Organization & Environment, 13(2), pp. 123-58.

Moore, J.W. (2010a). Amsterdam is standing on Norway. Part I: the alchemy of capital, empire, and nature in the diaspora of silver, 1545-1648. *Journal of Agrarian Change*, 10(1), pp. 35-71.

Moore, J.W. (2010b). Amsterdam is standing on Norway. Part II: the global North Atlantic in the ecological revolution of the seventeenth century. *Journal of Agrarian Change*, 10(2), pp.188-227.

Moore, J.W. (2011). Transcending the Metabolic Rift, *Journal of Peasant Studies*,38(1)

Moore, J.W. (2015). *Capitalism in the Web of Life: Ecology and the Accumulation of Capital*

Moran, D., Wackernagel, M., Kitzes,J., Goldfinger, S., Boutaud, A. (2008). Measuring sustainable development - nation by nation. *Ecological Economics.*, 64 (2008), pp. 470-474

Moreau, V., Sahakian, M., Van Griethuysen, P., Vuille. F. (2017). Coming Full Circle: Why Social and Institutional Dimensions Matter for the Circular Economy. *Journal of Industrial Ecology.* Special Issue: Exploring the Circular Economy. 21(3), pp. 497-506.

Morin, E. (1977). *La méthode 1, La nature de la nature*, Paris, Editions du Seuil.

Morin, E. (1991a). *De la complexité : complexus, in Les Théories de la Complexité. Autour de l'œuvre d'Henri Atlan*, Ed. F. Fogelman-Soulie, Editions du Seuil, Paris, pp. 283-296.

Morin, E. (1991b). *La méthode 4, Les idées* , Paris, Editions du Seuil.

Morin, E. (1995). *La méthode 5, Humanité de l'humanité* , Paris, Editions du Seuil.

Morin, E. (2005). *Introduction à la pensée complexe*, Paris, Editions du Seuil.

Morishima, M. (1974). Marx in the Light of Modern Economic Theory. *Econometrica*, 42(4), pp. 611-632.

Morowitz, H.J. (1968). *Energy Flow in Biology*. Academic Press, New York.

Morowitz, H.J. (1979). *Energy Flow in Biology*. Ox Bow Press, Woodbridge, CT.

Mouchart, A. Fourrié, L. (2004). *Systèmes d'élevage intensifs, pollution diffuse par les nitrates et le phosphore de l'eau d'un bassin versant*. INRA-CEMAGREF.

Müller, B., Gomez-Echeverri L. (2009). *Le mécanisme financier restructuré de la CCNUCC Architecture at gouvernance.*

Naidoo, R., Ricketts, T.H. (2006). Mapping the economic costs and benefits of conservation. *Plos Biology* 4(11), pp. 2153-2164.

Nakamura, S., Kondo, Y. (2002). Input-Output Analysis of Waste Management. *Journal of Industrial Ecology*, 6(1), pp.39-63. doi: 10.1162/108819802320971632

NETGREEN (2015). *Final Conference (25 October 2015, CEPS) - Proceedings. Accelerating the transition to a green economy in Europe: National/regional strategies and the new Sustainable Development Goals*

Nicco, L. (2014). *Rapport national d'inventaire Inventaire des émissions de polluants atmosphériques et de gaz à effet de serre en France - Séries sectorielles et analyses étendues.*

Nicola J. Smith, Garry W. McDonald, Murray G. Patterson (2014). Is there overshoot of planetary limits? New indicators of human appropriation of the global biogeochemical cycles relative to their regenerative capacity based on 'ecotime' analysis. *Ecological Economics*, 104, August 2014, pp. 80-92.

Nieto, A., Malavolti, C., Massat, F., Lemaire, O. (2014). *Etude d'opportunité pour l'écologie industrielle et territoriale sur le territoire du grand Roissy*. Projet collectif du master Governing the Large Metropolis.

OCDE (ORGANISATION DE COOPÉRATION ET DE DÉVELOPPEMENT ÉCONOMIQUES). (2008). *Measuring material flows and resource productivity, Volume I. The OCDE Guide*, OCDE, pp. 52

OCDE (ORGANISATION DE COOPÉRATION ET DE DÉVELOPPEMENT ÉCONOMIQUES). (2010). *L'éco-innovation dans l'industrie favoriser la croissance verte.*

O'Connor, M.(1986). *Far from equilibrium: Thermodynamics and environmental economics*. Graduate School of environmental Science. Monash University, 79 p.

O'Connor, M.(1989). *Codependency and indeterminacy: A critique of the theory of production. Capitalism Nature Socialism*, 1(3).

O'Connor, M.(1991). Entropy, Structure and organizational change . *Ecological Economics*., 3(2), pp. 95-122.

O'Connor, M.(1993a). Entropic irreversibility and uncontrolled technological change in economy and environment. *Journal of Evolutionary Economics,* 3(4), pp. 285-315

O'Connor, M.(1993b). *Value System Contest and the Appropriation of Ecological Capital*, The Manchester School, LXI(4), December 1993, pp. 398-424.

O'Connor, M.(1994a). Complexity and Coevolution: Methodology for a Positive Treatment of Indeterminancy. *Futures*, 26(6), pp. 610-615.

O'Connor, M.(1994b). *Is Capitalism Sustainable? : Political Economy and the Politics of Ecology.* The Guilford Press, 283 p.

O'Connor, M. (1994c). *On the misadventures of capitalist nature. In Is capitalism sustainable? Political economy and the politics of ecology* , pp. 125-151. New York: Guilford Press. Reid, W. V., L

O'Connor, M. (1996). *Cherishing the future, cherishing the other: a 'post-classical' theory of value.* pp. 321-344 en: S. Faucheux, D. Pearce and J. Proops(eds.1996) *Models of Sustainable Development*, Edward Edagr, Aldershot.

O'Connor, M. (1998). Theory of value for open systems reproduction: the role of energy-based numéraire in analysis for sustainability. *Advances in Energy Studies*, pp. 49-76.

O'Connor, M., Schoer, K. (2009). *Environmental Degradation in the new SEEA Proposals for a systematic presentation of environmental degradation in the framework of EEA*. Federal StatisticalOfficeGermany.URL:https://www.destatis.de/EN/Publications/Specialized/EnvironmentalEconomicAccounting/EnvironmentalEconomicAccounting_EEA.pdf?__blob=publicationFile

Odum, H. T. (1971). *Environment, Power, and Society.* Wiley-Interscience, New York.

Odum, H. T. (1983). *Systems Ecology.* John Wiley, New York.

Odum, H.T. (1996). *Environmental Accounting: Emergy and Environmental Decision Making*, John Wiley & Sons, New York

ORDIF (Observatoire régional des Déchets d'Île-de-France)(2004). *Etat de la gestion des déchets ménagers en Ile-de-France. Chiffres clés 2002. Tableau de bord régional bisannuel, La Défense.*

ORDIF (Observatoire régional des Déchets d'Île-de-France)(2006). *Quelle gestion des déchets ménagers et assimilés en 2004 ? Enquête et tableau de bord de l'ORDIF.*

Orru, S. (2013). *Table ronde n°1 - économie circulaire. Conférence Environnementale Palais d'Il*éna - Paris.

Ostwald, W. (1907). The modern theory of energetics. *The Monist* 17, pp. 511.

Ostwald, W. (1911). Efficiency. *The Independent* 71, pp. 867-871.

Oudart, B. (2005). *Evolution des emissions acides en France (1980-2004*). (Centre Interprofessionnel d'Études de la Pollution Atmosphérique)-Citepa

Parrinello, S. (2002). Sraffa's Legacy En Economics Some Critical Notes. *Metroeconomica*, 53(3).

Pasquier, J.L. (2012). *L'empreinte carbone de la consommation des Français : évolution de 1990 à 2007*, Le point sur n° 114, ministère de l'Écologie, du Développement Durable et de l'Énergie, Commissariat général au Développement durable.

Passet, R. (1979). *L´Économique et le vivant.*

Passet, R. (1996). *L´Économique et le vivant* (2 édition).

Passineti, L. (1966). Paradoxes in capital theory: a symposium changes in the rate of profit and switches of techniques. *The Quarterly Journal of Economics*, 80(4), pp. 503-517.

Passinetti, L. (1979). Lectures on the Theory of Production.

Passinetti, L. (1985). Leçons sur la théorie de la production.

Patten, B.C., Straskraba, M., Jørgensen, S.E. (1997). Ecosystems emerging: 1. conservation. *Ecological Modelling,* 96(1-2), pp. 221-284.

Patterson, M.G. (2002). Ecological production based pricing of biosphere processes. *Ecological Economics*, 41(3), pp. 457-478.

Patterson, M. G., Wake, G. C., McKibbin, R., & Cole, A. O. (2006). Ecological pricing and transformity: A solution method for systems rarely at general equilibrium. *Ecological Economics*, 56(3), pp. 412-423.

Patterson, M.G. (2012). Are all processes equally efficient from an emergy perspective?: Analysis of ecological and economic networks using matrix algebra methods. *Ecological Modelling,* 220(10), pp. 77-91

Patterson, M.G. (2014). Evaluation of matrix algebra methods for calculating transformities from ecological and economic network data. *Ecological Modelling*, 271(10), pp. 72-82.

Payraudeau, S. (2002). *Modélisation distribuée des flux d'azote sur des petits bassins versants méditerranéens.* Thèse ENGREF-CEMAGREF. URL: https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00005633/document

Pedersen, O. G., De Haan, M. (2006). The system of environmental and economic accounts. 2003 and the economic relevance of physical flow accounting , *Journal of Industrial Ecology*, vol. 10, nos 1-2, pp. 19-42.

Perret, B. (2014). L'économie circulaire, état des lieux et perspectives. *Rapport n ° 009548 - 06. Ministère de l'écologie, du développement durable et de l'énergie.* URL: http://www.ladocumentationfrancaise.fr/var/storage/rapports-publics/154000005.pdf

Perrings, C. (1986). Conservation of Mass and Instability in a Dynamic Economy-Environment System. *Journal of Environmental Economics and Management*, 13.

Perrings C. (1987). *Economy and Environment: A Theoretical Essay on the Interdependence of Economic and Enviromental Systems*, Cambridge, Cambridge University Press.

Perrings, Ch. (1998). Resilience in the Dynamics of Economy-Environment Systems. *Environmental and Resource Economics* 11(3-4): pp. 503-520.

Piacentini, P. (1995). A time-explicit theory of production: Analytical and operational suggestions following a 'fund-flow' approach. *Structural Change and Economic Dynamics* 6, pp. 461-483.

Pimentel, D., Pimentel, M. (1979). *Food, Energy, and Society.* Edward Arnold, London.

PNUE (2014). *Convention Bale sur le contrôle des mouvements transfrontières du déchets dangereux et de leur élimination. Protocole sur la responsabilité et l'indemnisation en cas de dommages résultant de mouvements transfrontières et de l'élimination du déchets dangereux.* URL : http://www.basel.int/Portals/4/Basel20Convention/docs/text/BaselConventionText-f.pdf

Point, P. (2012). *L'évaluation des services des écosystèmes liés aux milieux aquatiques. Eléments de méthodologie.* GREThA, CNRS, UMR 5113, Université de Bordeaux. URL : http://gretha.u-bordeaux.fr/fr/cahiers-du-gretha/les-cahiers-2012/l%E2%80%99%C3%A9valuation-des-services-des-%C3%A9cosyst%C3%A8mes-li%C3%A9s-aux-milieux

Prévot, H (2000). *La récupération de l'énergie issue du traitement des déchets* . Conseil général des Mines Juillet 2000. Ministère de l'Economie, des finances et de l'industrie. URL: http://emericmenard.energie.free.fr/documents/Rapport-%20R%E9cup%E9ration%20d%E9nergie%20issue%20des%20d%E9chet%20juillet%20200.pdf

Prigogine, I. (1967). *Thermodynamics of Irreversible Processes*, 3rd edn. Wiley/Interscience, New York.

Prigogine, I. (1996). *Introduction à la thermodynamique des processus irréversibles*, Jacques Gabay, Blong, Paris.

Quesnay, F. (1766). *Le tableau économique.*

Rakib, A (2012) . *Valorisation du méthane en hydrogène par reformage catalytique.* Thèse Université du Littoral. URL: https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00828240/document

Ramos-Martin, J., Giampietro, M. (2005). Multi-scale integrated analysis of societal metabolism: learning from trajectories of development and building robust scenarios. *International Journal of Global Environmental Issues* 5 (3/4), pp. 225-263.

Ramos-Martin, J., Giampietro, M., Mayumi, K. (2007). On China's exosomatic energy metabolism: an application of multi-scale integrated analysis of societal metabolism (MSIASM). *Ecological Economics* 63 (1), pp. 174-191.

Rappaport, R.A. (1971). The flow of energy in an agricultural society. *Scientific American* 224: 117-133.

Raugei,M., Sgouridis,S., Murphy,D., Fthenakis,V., Frischknecht,R., Breyer,C., Bardi,U ., Barnhart,C., Buckley,A., Carbajales-Dale,M., Csala,D., Wild-Scholten,M., Heath,G., A,Jæger-Waldau., Jones,C., Keller,A., Leccisi,A., Mancarella,P., Pearsall,N., Siegel,A,. Sinke,W., Stolz, P.(2017). Energy Return on Energy Invested (ERoEI) for photovoltaic solar systems in regions of moderate insolation: A comprehensive response. *Energy Policy.* 102, Pages 377-384

Ravagnani, F. (2002). *Produced Quantities and Returns in Sraffa's Theory of Normal Prices: Textual Evidence and Analytical Issues. Is There Progress in Economics? URL:* http://www.gbv.de/dms/zbw/662133668.pdf

Ricardo, D. (1817). *On The Principles of Political Economy and Taxation.*

Rockström, J., Steffen,W., Noone,K., Persson, Å., Chapin,F.S., Lambin,T., Lenton, M., Scheffer,M., Folke,C., Schellnhuber,H-J., Nykvist,B., De Wit, C., Hughes,T., Van der Leeuw,S., Rodhe,H., Sörlin,S., Snyder,P-K., Costanza,R., Svedin,U., Falkenmark,M., Karlberg,L., Corell,R-W., Abry,V-J., Hansen,J., Walker,B., Liverman,D., Richardson,K., Crutzen,P., Fole, J-A.(2009). Planetary Boundaries: Exploring the Safe Operating Space for Humanity. A safe operating space for humanity. *Science*, 461. URL: http://www. ecologyandsociety.org/vol14/iss2/art32/

Rollin, D. Bouarfal, S. (2013). *Irrigation en France : État des lieux, enjeux et perspectives.*

Sabine, C .Feely, R. Gruber, N. Key, R-M. Lee, K. Bullister, J-L. Wanninkhof, R. Wong, C. S. Wallace, D. Tilbrook, B. Millero, F-J. Peng, T-H. Kozyr, A. Ono, T.Rios, A. (2004). The Oceanic Sink for Anthropogenic CO2 . *Science* pp. 305 - 367.

Salvatori, N., Steedman, I. (1988a). Joint Production Analysis in a Sraffian Framework. *Bulletin of Economic Research,* 40(3).

Samuelson, P. A. (1957). Wages and Interest: A Modern Dissection of Marxian Economic Models. *The American Economic Review*, 47(6), pp. 884-912. doi: 10.2307/1810042

Samuelson, P. A. (1971). Understanding the Marxian Notion of Exploitation: A Summary of the So-Called Transformation Problem Between Marxian Values and Competitive Prices. *Journal of Economic Literature*, 9(2), 399-431. doi: 10.2307/2721055

Saveyn, H., Eder, P., Ramsay, M., Thonier, G., Warren, K., Hestin, M. (2016). *Towards a better exploitation of the technical potential of wasteto-energy.* European Commission. JRC science for policyreport.URL:http://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/bitstream/JRC104013/wte%20report%20full%2020161212.pdf

Schandl, H., Müller, D. B., Moriguchi, Y. (2015). Socioeconomic metabolism takes the stage in the international environmental policy debate: A special issue to review research progress and policy impacts. *Journal of Industrial Ecology* , 19(5), pp. 689-694.

Schefold, B. (1989). *Mr Sraffa On Joint Production And Other Essays.*

Schefold, B. (2001). Critique of the Corn-Huano Model. *Metroeconomica*, 53(2).

Schilgen, O. (2013). *Energy as the Numéraire of any Given Economy.*

Schmidt-Bleek, F. (1994). *Wieviel Umwelt braucht der Mensch?: MIPS e Das Mass für ökologisches Wirtschaften. Birkhäuser*, Berlin, Basel, Boston.

Schoer, K. Flachmann,C (2002). *Water Flow Accounts as Part of Material and Energy Flow Accounts in Germany.*

Schoer, K. Giegrich, J. Kovanda, J. Lauwigi, C. Liebich, A. Buyny, S. Matthias, J. (2012). *Conversion of european product flows into raw material equivalents.* Heidelberg GmbH.

Schrodinger, E. (1944). *What Is Life?.* Cambridge University Press. 194 p.

Screpanti, E. (1993). Sraffa after Marx: a new interpretation. *Review of Political Econ*omy, 5(1).

Serre, D. (2013). *La ville résiliente aux inondations méthodes et outils d'évaluation.*

Seton, F. (1957). The Transformation Problem. *The Review of Economic Studies*, 24(3), pp.149-160. doi: 10.2307/2296064

Sewertzoff, A.N. (1930). *Théorie de l'Aromorphose. Sources indirectes, dont Zotin*

Shannon, C E. (1948). A Mathematical Theory of Communication. *Bell System Technical Journal*, 27 (3), pp. 379-423

Shao, L., Chen. G.Q. (2016). Exergy based renewability assessment: Case study to ecological wastewater treatment. *Ecological Indicators* 58, November 2015, pp. 392-401

Shepon, A., Israeli, T., Eshel, G., Milo, R. (2013a). EcoTime An intuitive quantitative sustainability indicator utilizing a time metric. *Ecological Indi*cators, 24(0), pp. 240-245. URL: http://dx.doi.org/10.1016/j.ecolind.2012.06.018

Sinha, A., Dupertuis, M.-S. (2009). Sraffa's system: Equal rate of profits and the notion of center of gravitation. *Journal of Economic Behavior & Organization*, 71(2), pp.495-501. URL: http://dx.doi.org/10.1016/j.jebo.2009.03.014

SIVOM (2012). *Guide des bonnes pratiques de gestion des effluents et des déchets industriel.* URL : http://www.sivom-region-cluses.fr/

Slesser, M. (1978). *Energy in the Economy.* MacMillan, London.

Smil, V. (1987). *Energy, Food, Environment: Realities, Myths, Options.* Oxford University Press, Oxford.

Smil, V. (2002) *Phosphorus: Global Transfers. Vol° 3, Causes and consequences of global environmental change,* pp. 536-54.

Sorman, A.H., Giampietro, M. (2011). Generating better energy indicators: addressing the existence of multiple scales and multiple dimensions. *Ecological Modelling,* 223(1), pp.41-53 URL : doi:10.1016/j.ecolmodel.2011.10.014.

Sperandio, M (2011). *La valorisation du phosphore des effluents.* LISBP-INSA Toulouse.

Sraffa, P. (1926). The Laws of Returns under Competitive Conditions. *The Economic Journal*, 36(144), pp. 535-550.

Sraffa, P. (1930). Notes and discussions. *The Quarterly Journal of Economics*, 44(3), pp. 539-545

Sraffa, P. (1960). *Production of commities by mean of commodities. Prelude to a critique of economic theory.*

Sraffa, P. (1970). *Production de marchandises par des marchandises*, Paris, Dunod 1970.

Stahmer, C., Kuhn, M., Braun, N. (1996). *Physical Input-Output Tables: German Experiences*, dans Proceedings of the Third Meeting of the London Group on Natural Resource and Environmental Accounting, Stockholm: Statistics Sweden.

Stahmer, C., Kuhn, M., Braun, N. (1998), Physical Input-output Tables for Germany, 1990, Eurostat *Working Papers*, 2/1998/B/1, Brussels: European Commission.

Statistique Canada. (2006). *Enquête sur l'industrie de la gestion des déchets : secteur des entreprises et des administrations publiques, Ottawa : Division des comptes et de la statistique de l'environnement*, pp. 79

Steedman, I. (1977). Basics, Non-Basics and Joint Production. *The Economic Journal*, 87(346), pp. 324-328.

Steedman, I. (1992). Joint Production and the 'New Solution' to the Transformation Problem: *Indian Economic Review*, 27, pp. 123-127

Stefano, Z., Fredholm, T. (2011). *An Algorithmic Contribution to a Sraffian Measurement of Technological Progress.*

Steffen, W., Katherine Richardson., Rockström,J ., Cornell,S., Fetzer,I., Bennett,E., Biggs,R.,Carpenter,S-R., De Vries,W., De Wit,C-A., Folke1, C.,Gerten, D., Heinke,J.,Mace, G-

M.,Persson,L-M., Ramanathan,V., Reyers,V., Sörlin,S. (2015). Planetary boundaries: Guiding human development on a changing planet. *Science*, 347

Straskraba, M., Jørgensen, S.E., Patten, B.C., (1999). Ecosystem emerging: 2. dissipation. *Ecological Modelling*. 117 (1), pp. 3 - 39.

Stricker, A-E. Héduit, A. (2010a). *Phosphore des eaux usées : Etat des lieux et perspectives.*

Stricker, A-E.Héduit, A. (2010b). *Phosphore des eaux usées : nouvelles données, conséquences pour l'épuration.* Journée d'échanges ONEMA-Cemagref sur le Traitement des eaux usées, des boues et des matières de vidange pour les petites et moyennes collectivités, Pollutec, Lyon, 2 décembre 2010.URL :http://cemadoc.irstea.fr/oa/PUB00029856-phosphore-des-eaux-usees-nouvelles-donnees-consequ.html

Suez Environment (2014). *Refine the treatment of urban and industrial wastewater OxyblueTM.*

Sundin, E. (2004). *Product and Process Design for Successful Remanufacturing*. In PhD Dissertation Linköping'sUniversitet.URL :https://pdfs.semanticscholar.org/0dc7/3e98126024bb2641cbfa4d7b1eba53d2d32e.pdf

SYCTOM (2006). *Recyclage et valorisation énergétique Le centre multifilières à Ivry-Paris XIII.* URL : http://www.syctom-paris.fr/installations-et-projets/installations/ivryparis-xiii/centre-de-tri.html

Takase, K., Kondo, Y., & Washizu, A. (2005). An Analysis of Sustainable Consumption by the Waste Input-Output Model. *Journal of Industrial Ecology*, 9(1-2), pp. 201-219.

Teilhard de Chardin, P. (1964). *The Future of Man*. New York

Tennant, M., Brennan, G., Blomsma, F. (2015). *Chapter 18: Business and production solutions: Closing the Loop*. In: (Ed) Kopnina, H. and Shoreman-Ouimet, E., Sustainability: Key Issues, EarthScan.

The SROI Network (2012). *A guide to Social Return on Investment*. URL : http://socialvalueint.org/wp-content/uploads/2016/12/The-SROI-Guide-2012.pdf

Thual, J (2013). *Bilan national des projets Biogaz* au 1er Juillet 2013. ADEME.

Trévard, B (2013). *La diminution de l'énergie nette, frontière ultime de l'Anthropocène.*

Tukker A., Evgueni P., Heijung R. (2009). Towards a global multi-regional environmentally extended input-output database, *Ecological Economics* ,68(7), 1928-1937.

Tunney, H. (1997). *Phosphorus Loss from Soil to Water*, CAB International, Wallingford.

Turing, A. (1936). *On computable numbers, with an application to the Entscheidungs problem.*

Tyle, J. (1996). *Regenerative Design for Sustainable Development.*

Ulanowicz, R.E. (1983). Identifying the structure of cycling in ecosystems. *Mathematical Biosciences,* 65(2), pp. 210-237

UNEP (2008). *Vital Water Graphics An Overview of the State of the World's Fresh and Marine Waters* - 2nd Edition

Van Bambeke, V. L. (2009). *L'incongruence de la prétendue, correction par Ladilaus Von Bortkiewicz de la méthode de calcul des prix de production de Karl Marx* . Vol 1, pp.197-232

Van den Bergh, J., Verbruggen,H. (1999). Spatial sustainability, trade and indicators: an evaluation of the ecological footprint. *Ecological Economics*, 29 (1), pp. 61-72

Van Vliet, A. (2014). *Etude de cas étude de n°1. L'historia de capannori. Zero waste europe.*

Vandaele, D. Lebreton, A. Faraco, B. (2010). *Agriculture et gaz à effet de serre : état des lieux et perspectives.*

Vázquez, M.A., Soto, M.(2017). The efficiency of home composting programmes and compost quality. *Waste Management*, 64, June 2017, pp. 39–50

Vernadski, V. (1926). *The Biosphere*. Synergetic Press, Oracle, AZ.

Vernadsky, V. (1930). *L'étude de la vie et la nouvelle physique. Conférence faite à la société des naturalistes de Moscou et de Leningrad*. URL : http://vernadsky.fr/documents.html

Vernadsky, V. (1997). *La Biosphère*. Préf. de Jean-Paul Deléage (Paris: Diderot Éd., 1997). In: Revue d'histoire des sciences, tome 53, n°3-4, 2000. pp. 635-636 URL : http://www.persee.fr/doc/rhs_0151-4105_2000_num_53_3_2102_t1_0635_0000_1

Victor, P. (1972a). *Pollution: Economy and Environment*, Toronto University Press, Toronto.

Victor, P. (1972b). *Economics of pollution*. MacMillan studies in economics, Royaume-Unis, pp. 78

Wackernagel, M., Rees, W. (1996). *Our Ecological Footprint: Reducing Human Impact on the Earth*. New Society Publishers, Gabriola Island

Wall, G. (1977). Exergy a useful concept within resource accounting. *Report no. 77-42,* Institute of Theoretical Physics, Chalmers University of Technology and University of Göteborg, Sweden

Wallerstein, I. (1974). *The modern World System I: Capitalist Agriculture and the Origins of the European World-Economy in the Sixteenth Century.*

Wallerstein, I. (2004). *World-systems Analysis: An Introduction*

Walras, L. (1874). *Éléments d'économie politique pure ou théorie de la richesse sociale.*

Watson, A.J,. Lovelock, J. E . (1983). Biological Homeostasis of the Global Environment: the Parable of Daisyworld. *Tellus B: Chemical and Physical Meteorology*, 35(4), 284-289. . URL: http://www.tandfonline.com/doi/pdf/10.3402/tellusb.v35i4.14616

White, L.A. (1949). *The Science of Culture: A Study of Man and Civilization.* Farrar, Straus, New York.

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.
URL: https://www.sei-international.org/mediamanager/documents/Publications/Future

Wiedmann, T., Minx, J., Barrett, J., Wackernagel, M. (2006). Allocating ecological footprints to final consumption categories with input-output analysis. *Ecological Economics,* 56(1), pp. 28-48

Wilden, A. (1972). *System and Structure.*

Yifang, L.,Renchen, T., Jian, X. (2007). *The Input-Output Analysis of the Circular Economy.* Conference paper. 16th International Conference on Input-Output Techniques. URL : https://www.iioa.org/conferences/16th/papers.html

Zero waste project. (2015). *Low Cost Zero Waste Municipality. Phase 4.1.* (1G-MED08-533)(URL: https://www.coursehero.com/file/21494818/swot-analysispdf/

Zipf, G.K., (1941). *National Unity and Disunity: The Nation as a Bio-social Organism.* Principia Press, 408 p.