

NNT : 2016SACLV001

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

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

Discipline : Sciences Economiques

Spécialité : Economie Ecologique

Par

Mr **Richard Loiret**

Le **Bilan** *écologique*

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

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

Présentée et soutenue publiquement à Rambouillet,
Bergerie nationale, le 27 janvier 2016

Membres du Jury :

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

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

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

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

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

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

Résumé

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

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

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

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

Abstract

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

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

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

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

Introduction générale

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

A. Une interrogation centrale

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

Au sens purement *physique*, une description *originelle*² très simplifiée de la Cité nous la présenterait comme un volume construit intégrant l'habitat et les services communs essentiels à la vie du citoyen, l'ensemble étant circonscrit par un périmètre spécifique, forme de rempart la séparant et l'isolant du monde extérieur³ (*Oïkos* et nature au sens large), duquel elle tirera ses ressources de développement et d'entretien.

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

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

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

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

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

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

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

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

Toute l'histoire économique de l'humanité prouve sans contredit que la nature elle aussi joue un rôle important dans le processus économique ainsi que dans la formation de la valeur économique. Il est grand temps, me semble-t-il, d'accepter ce fait et de considérer ses conséquences pour la problématique économique de l'humanité. Car ainsi que je tenterai de le montrer ci-après, certaines de ces conséquences revêtent une importance exceptionnelle pour la compréhension de la nature et de l'évolution de l'économie humaine [...] Quelques économistes ont relevé que l'homme ne peut ni créer ni détruire de la matière ou de l'énergie, vérité qui découle du *principe de conservation de la*

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

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

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

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

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

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

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

La Cité est une *structure dissipative anthropogénique*⁶.

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

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

De ce fait, tout développement, c'est à dire toute augmentation de son ordre interne, se traduira *ipso facto* par un niveau correspondant de consommation de l'ordre externe, remplacé par du désordre entropique⁷.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

B. Le vrai challenge ...

Notre état de la question *introductif* rendra compte d'une translation historique du débat *sur la nature de la Nature*, dont nous déduirons un cadre sémantique d'analyse et de synthèse des relations homme-nature, et à partir duquel nous rendrons compte des

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

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

carences de l'*Empreinte écologique*, en forme de schéma éclairant ses différentes critiques, puis présenterons l'assise conceptuelle et le cadre opérationnel de mesure du nouveau *Bilan écologique* que nous proposons.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Ces deux volets de notre interrogation centrale, et les deux composantes de la problématique globale découlant de son second volet, porteront ainsi notre thèse sur le terrain d'une recherche aux enjeux très diversifiés⁹.

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

⁹ Que nous nous efforcerons de traiter en visant une cohérence maximale du propos.

C. ... et ses enjeux

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

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

(Premier volet de notre interrogation centrale)

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

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

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

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

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

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

Troisième partie : *Développements méthodologiques du Bilan écologique*

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

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

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

D. Plan de thèse

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Troisième partie : *Développements méthodologiques du Bilan écologique*

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Conclusion générale

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