

**PROSMAR**

(prospective maritime)

**Echanges Maritimes Mondiaux  
Au XXIème Siècle**

- 4 -

annexes

François Lille

Julie Hazemann

Rémi Debeauvais

Octobre 1994

CDAT  
9796 D

Ce document fait partie du compte-rendu final d'un programme triennal de recherche financé par la Mission de la Recherche du Ministère chargé de la Mer, décisions d'aide n° 92.04.01 du 15 Mai 1991 (titulaire IETM) et 92.04.07 du 9 Juin 1992 (titulaire ITHAQUE).

La première phase a été réalisée entre Mai 1991 et Mai 1992 par une équipe constituée de François LILLE, Julie HAZEMANN et Monique JAMOIS, sous la responsabilité scientifique de Monique JAMOIS, Directeur de l'IETM.

La seconde phase a été réalisée entre Juin 1992 et Juin 1994 par une équipe constituée de François LILLE, Rémi DEBEAUVAIS et Julie HAZEMANN, sous la responsabilité scientifique de François LILLE et Rémi DEBEAUVAIS.

Les travaux ont été régulièrement suivis par Georges TOURRET. La seconde phase a été suivie par un comité de pilotage constitué par MM. TOURRET et HARTMANN de la Direction de la Flotte de Commerce, M.PAGES de la Compagnie Générale Maritime M.PICHERAL du Port Autonome de Marseille et M.PAPINUTTI de l'INRETS, et présidé par Georges TOURRET.

Les quatre documents qui constituent le compte-rendu de la recherche sont les suivants

*Volume n° 1 : méthodes, moyens et matériaux*

*Volume n° 2 : prospectives et scénarios*

*Volume n° 3 : sélections de documents*

*Volume n° 4 : annexes*



Le présent document est le volume n° 4

Les coordonnées actuelles des chercheurs ayant participé à ce travail sont les suivantes :

François LILLE - ORES, 12 rue François Belléouvre 92240 Malakoff. Tel 33.1.46 57 48 38

Julie HAZEMANN - WISE-PARIS, 5 rue Buot 75013 Paris. Tel 33 1 45 65 47 93

Rémi DEBEAUVAIS - ITHAQUE, 5 rue de Charonne 75011 Paris. Tel 33 1 47 00 55 34

Monique JAMOIS - MANAUS-Consultants, 109 Bd St Michel 75005 Paris. Tel 33 1 43 25 61 57





L'annexe A est le "cadrage écologique des échanges planétaires de matière", c'est la reproduction de la deuxième partie du rapport de première phase du programme de recherche.

L'annexe B présente un des modèles prospectifs globaux que nous avons analysés, POLESTAR (voir volume n°1 section 3.1.1). Celui-ci ne produit pas de résultats généraux utilisables pour notre problème, il est donc exposé seulement ici sur le plan méthodologique.

L'annexe C présente schématiquement les 13 scénarios produits récemment par le modèle WORLD3 (voir section 3.1.1 du volume n°1 et 1.4.1 du volume n°2).

L'annexe D est la reproduction du programme initial de la recherche.



<b>ANNEXE A - CADRAGE ÉCOLOGIQUE DES ÉCHANGES PLANÉTAIRES DE MATIÈRES</b>	<b>1</b>
<b>ANNEXE B - LE MODÈLE POLESTAR</b>	<b>53</b>
<b>ANNEXE C - SCÉNARIOS DE "BEYOND THE LIMITS"</b>	<b>61</b>
<b>ANNEXE D - PROGRAMME DE RECHERCHE INITIAL</b>	<b>75</b>



## **ANNEXE A - CADRAGE ÉCOLOGIQUE DES ÉCHANGES PLANÉTAIRES DE MATIÈRES**

*Le texte qui suit a été écrit il y a un peu plus de deux ans, dans le cadre du rapport de première phase de la recherche. Depuis, l'état des connaissances générales a progressé, le notre aussi. A la relecture, ce texte nous paraît cependant constituer un cadrage encore valable des échanges planétaires de matière. A l'exception de corrections mineures ou de pure forme, nous le reprenons donc intégralement*

## SOMMAIRE DE L'ANNEXE A

<b>A.1 - ÉCOLOGIE GLOBALE.....</b>	<b>1</b>
<b>A.1.1 - l'écologie, définitions et délimitations.....</b>	<b>1</b>
<b>A.1.2 - l'écosphère, description.....</b>	<b>3</b>
A.1.2.1 son histoire et ses rythmes .....	3
A.1.2.2 ses compartiments : atmo, hydro, litho...sphère .....	5
A.1.2.3 ses constituants : eau, gaz, solides .....	6
l'eau.....	6
les gaz.....	6
les solides.....	6
A.1.2.4 ses états : bio- et nécromasse, sols.....	6
la biomasse.....	6
la nécromasse.....	7
le sol.....	7
A.1.2.5 biomes terrestres et écosystèmes aquatiques.....	8
Biomes continentaux .....	10
macroécosystèmes aquatiques .....	10
zonation en altitude.....	10
<b>A.1.3 - économie générale de l'écosphère : l'énergie</b>	<b>11</b>
A.1.3.1 l'écosphère : un système énergétique ouvert .....	11
A.1.3.2 climats.....	13
<b>A.1.4 - productivité et efficacité des écosystèmes ...</b>	<b>14</b>
A.1.4.1 production et productivité.....	14
A.1.4.2 efficacité des écosystèmes.....	16
A.1.4.3 notion de pyramide écologique .....	17
A.1.4.4 les trois mesures.....	18
<b>A.1.5 - la diversité du vivant .....</b>	<b>19</b>
<b>A.1.6 - économie de la matière : les grands cycles..</b>	<b>21</b>
A.1.6.1 l'économie cyclique de la matière.....	21
A.1.6.2 le cycle de l'eau.....	22
A.1.6.3 le cycle du carbone.....	24
A.1.6.4 le cycle de l'oxygène.....	25
A.1.6.5 le cycle de l'azote .....	25
A.1.6.6 le cycle du phosphore.....	26
A.1.6.7 le cycle du soufre.....	29
<b>A.1.7 - conclusion.....</b>	<b>29</b>
<b>A.2 - SOCIO-ÉCONOMIE ET ÉCOLOGIE HUMAINE .....</b>	<b>30</b>
<b>A.2.1 - questions et réponses.....</b>	<b>30</b>
A.2.1.1 questions planétaires courantes .....	30
A.2.1.2 recherche des réponses théoriques.....	32
A.2.1.3 y a-t-il une réponse pragmatique ? .....	33
A.2.1.4 conclusion initiale .....	35
<b>A.2.2 - points de vue socio-économiques sur la nature</b>	<b>35</b>
A.2.2.1 lacunes des économistes ou limites de l'économie de marché ?	35
A.2.2.2 élargir ces limites pour intégrer l'écologie ? .....	38
A.2.2.3 conclusion économique.....	41
<b>A.2.3 - points de vue écologiques sur la société .....</b>	<b>41</b>

A.2.3.1	limites de l'approche écologique, ou lacunes des écologues ?	41
A.2.3.2	les premiers écolo-économistes .....	42
A.2.3.3	essais modernes d'écologie économique .....	44
	première formulation générale (Eugène R. Odum)	44
	Le courant éco-énergétique et la bio-économique	45
A.2.3.4	conclusion écologique.....	48
<b>A.3</b>	<b>- applications et conclusions.....</b>	<b>49</b>
A.3.1	- reformulation générale .....	49
	A.3.1.1.....l' économie est elle anti-écologique ?	49
	A.3.1.2réintégrer l'humanité dans l'étude de l'écosphère	50



## A.1 - ÉCOLOGIE GLOBALE

### A.1.1 - L'ÉCOLOGIE, DÉFINITIONS ET DÉLIMITATIONS

Pour étudier les équilibres et déséquilibres globaux qui ne manqueront pas d'influer à terme sur les échanges maritimes, il nous est donc apparu nécessaire de cadrer notre réflexion dans une approche écologique. Il s'agit à ce stade d'écologie scientifique, et non de ses diverses traductions ou anticipations sociales et politiques.

L'écologie est une discipline récente, encore souvent traitée comme une sous-branche de la biologie, alors qu'elle a vocation à devenir une des grandes disciplines de synthèse. Les écologues paraissent souvent des spécialistes de domaines apparemment très pointus, se consacrant à certaines variétés d'acariens, d'autres aux lombrics, au tchernozium, à la toundra... En réalité leurs travaux n'ont de sens que dans une compréhension du fonctionnement des systèmes vivants, et en dernière instance de la vie sur terre, globalement. Dans cette optique, chaque domaine précis est étudié en relation avec le fonctionnement d'ensemble, comme un élément d'un système.

Les écologues étudient les écosystèmes. Qu'entendent-ils par là ? Ecosystèmes, écosphère, biosphère, sont des termes qui ont acquis droit de cité, mais dont les définitions scientifiques méritent d'être précisées.

La définition d'un **écosystème** s'applique à toutes les échelles, du microcosme à la planète. Fondamentale sur le plan méthodologique, elle paraît bien établie. Pour Ramade<sup>1</sup> il s'agit d'une "*unité fonctionnelle, de nature écologique, stable dans le temps...*", où est associée "à un environnement physico-chimique spécifique —le biotope<sup>2</sup>— une

---

<sup>1</sup> "ELEMENTS D'ECOLOGIE - ECOLOGIE FONDAMENTALE ", François RAMADE, McGRAW-HILL, PARIS, FRANCE, 1991 - fiche n°54 - page 34.

<sup>2</sup> le biotope est le lieu colonisé par une biocénose (voir ci-dessous), donc en substance l'habitat d'un ensemble d'organismes.

*communauté vivante, ou biocénose<sup>1</sup>..." (...) Biotope et biocénose exercent l'un sur l'autre une interaction perpétuelle marquée essentiellement par d'incessants transferts d'énergie entre ces deux entités et à l'intérieur de chacune d'elles"*

Bouché précise cette définition dans les termes suivants (2)

*(...) l'écosystème constitue une organisation biophysicochimique où climats, sol et organismes sont considérés comme un système (...) C'est donc un système d'échange comportant des êtres vivants et des parties abiotiques. Les lois thermodynamiques obligent à un système globalement ouvert dégradant l'énergie; c'est l'un des modes de description de tels systèmes : à partir d'une entrée énergétique, on suit les divers niveaux de dégradation énergétique et les fractions non dégradées transmises à un autre compartiment. (...) Mais cette énergie non dégradée est aussi le lien chimique entre les constituants de la matière de sorte que l'on peut s'intéresser au parcours suivi dans les systèmes par les éléments chimiques dans le cadre de leurs diverses associations moléculaires, tissulaires, organiques et inorganiques....*

Biosphère, écosphère, géosphère, ces mots délimitent ou englobent ce que d'autres appellent plus poétiquement la "planète vivante".

La biosphère est l'ensemble des organismes vivants habitant notre planète. L'écosphère est l'ensemble de ces organismes et des milieux avec lesquels ils sont en relation. C'est donc l'ensemble des écosystèmes, la mince couche habitable et habitée de la planète<sup>3</sup>. Quant à la géosphère, c'est la planète Terre, jusqu'aux extrêmes limites de son enveloppe gazeuse.

Le domaine de compétence des écologues est l'écosphère. La recherche d'une approche systémique du fonctionnement de la planète nous fait entrer de plain-pied dans le champ de l'écologie globale, défini et balisé de manière plus ou moins restrictive par les écologues : en bonne logique universitaire, mais contre leur propre logique systémique, la plupart d'entre eux ont tendance ne pas y inclure l'espèce humaine.

En fin de compte, il y a dans l'écosphère que délimitent les écologues le vivant ("bios"), le non-vivant ("abios"), et en dehors, le Cosmos, le centre

---

<sup>1</sup> la biocénose définit l'ensemble des organismes vivant et se reproduisant en un lieu (le biotopoe) où de nombreuses interactions en fait une sorte de "communauté d'êtres vivants", suivant l'expression de Ramade. Par extension, on peut appeler ainsi la somme des organismes d'un écosystème. Le "bios" (vivant) de l'écosystème est la biocénose, son "abios" (non-vivant) est le biotope.

<sup>2</sup> "ECOLOGIE OPERATIONNELLE ASSISTEE PAR ORDINATEUR ", Marcel BOUCHE, INRA-CNRS, MASSON, PARIS - fiche n°36 - pages 107-108

<sup>3</sup> Mais ici les définitions varient. Pour certains (Ramade, Dreux ,....) la biosphère désigne l'ensemble des organismes vivants et de leurs milieux de vie. D'autres (Bouché notamment) limitent le sens de ce terme à l'ensemble des organismes vivants peuplant la planète, pour différencier le "bios" (le vivant) de l' "abios" (le non-vivant) qui est son habitat., et désignent le vivant avec son habitat sous le terme d'écosphère. Nous nous rallierons à cette dernière solution, qui évite un risque de confusion.

de la terre, ....et l'humanité ! Ce qui précède est caricatural, mais illustre un hiatus fondamental entre "sciences de la nature" et "sciences de l'homme" qui est en quelque sorte la "grande faille" de la pensée moderne. Car si les sciences humaines traitent la nature comme "l'environnement" de l'homme, tandis que les sciences de la nature traitent l'homme comme un agent extérieur à celle-ci, qui fera la synthèse ?

Une prospective à long terme des trafics maritimes mondiaux se situe sur ce hiatus.

## A.1.2 - L'ÉCOSPHERE, DESCRIPTION

### A.1.2.1 son histoire et ses rythmes

Les sciences de la nature commencent à donner quelques solides points de repère permettant de cadrer l'histoire de la vie sur terre dans celle de la planète, du système solaire et de l'univers. L'exposé pourrait en paraître superflu, mais constitue à notre avis une nécessaire mise en perspective de quelques questions que l'humanité devra résoudre.

Les temps de mise en place des équilibres qui sont actuellement mis en question sont sans commune mesure avec ceux des modifications qui les menacent. Ils se situent sur des échelles de temps diverses, qu'il importe de connaître pour relativiser les phénomènes étudiés. Dans le débat sur les climats, par exemple, on trouve pêle-mêle la question de l'effet de serre, celle de la couche d'ozone, les calottes glaciaires, le niveau des mers, et des économistes calculent gravement l'effet que pourrait avoir sur les prix des produits agricoles un léger réchauffement du climat.

Ceci nous situe dans des échelles de temps qui vont de quelques années (les prix) à un ou quelques milliards (la couche d'ozone, l'effet de serre), en passant par l'ordre du millier à la centaine de milliers d'années (les glaciations, le niveau des mers). Le degré d'importance de phénomènes dont certains conditionnent l'existence de la vie, ou de toute vie organisée, ou plus modestement des animaux supérieurs dont nous sommes, apparaît mieux si on parvient à les situer dans l'histoire de la vie sur terre.. Nous n'en ferons ici qu'un résumé<sup>1</sup>.

L'univers a 15 milliards d'années. Le système solaire, avec 4,6 milliards, a déjà franchi le milieu de son existence. Avant le soleil, il avait fallu au

---

<sup>1</sup> Les nécessités de l'exposé nous obligent ici à donner un caractère exagérément affirmatif à la relation de phénomènes dont la description, l'explication, la datation peuvent être encore très hypothétiques - mais nous ne pouvions poser ici les termes de la discussion.

moins une première génération d'étoiles pour élaborer les constituants atomiques de la matière. La vie sur terre a environ 4 milliards d'années d'existence, temps nécessaire pour arriver aux stades actuels d'organisation vitale.

L'effet de serre date de plus de quatre milliards d'années. Il permet notamment d'avoir sous forme liquide l'eau, constituant et véhicule fondamental de la vie et reste une condition permanente au maintien de celle-ci. La couche d'ozone stratosphérique ne date "que" d'un milliard d'années. Entre l'apparition des premières formes de vie et cette innovation, trois milliard d'années s'écoulent durant lesquelles les organismes vivants restent à un niveau très élémentaire : la photosynthèse se développe lentement, mais ne parvient pas encore à faire monter le taux d'oxygène atmosphérique à plus de 1% car les organismes utilisant ainsi l'énergie solaire doivent en même temps s'en protéger pour ne pas succomber sous les rayons ultra-violets de type B, les plus nocifs. L'ozone, forme tertiaire de l'oxygène, constitue alors dans la stratosphère l'écran sous lequel l'expansion vitale peut prendre un nouvel essor<sup>1</sup>.

Cette accélération de l'évolution s'accompagne d'une augmentation rapide de la teneur en oxygène de l'atmosphère, qui passe de 3% au début de l'ère primaire à 20% au début du crétacé. L'ère secondaire, et plus précisément le crétacé, s'achève il y a 65 millions d'années sur une catastrophe écologique dont les causes premières sont encore hypothétiques<sup>2</sup>. La thèse d'un changement climatique semble de plus en plus évidente. La plupart des espèces animales et végétales disparaissent. Ce désastre est suivi d'une reprise de la diversification des espèces animales et végétales, à partir de la sélection de celles qui ont survécu, qui mène directement aux populations présentes sur terre au moment de l'apparition de l'homme. Nous entrons dans l'ère tertiaire.

---

<sup>1</sup> C'est alors que se produit une subite augmentation du phytoplancton (plancton végétal), suivie près de 500 millions d'années plus tard par l'apparition de la première vie animale (métazoaires), puis la colonisation des terres émergées. Nous entrons presque dans la vie moderne (fin du pré-cambrien, début de l'ère dite "primaire" (ou 'paléozoïque') il y a 570 millions d'années), et tout se passe de plus en plus vite:

- 400 millions d'années : plantes vasculaires et insectes
- 350 millions d'années: gymnospermes et vie animale terrestre. Début du "carbonifère"
- 280 millions d'années : développement des reptiles (début de l'ère "secondaire")
- 200 millions d'années: premiers mammifères
- 100 millions d'années: angiospermes (plantes à fleurs)
- 65 millions d'années: disparition de nombreuses espèces vivantes, dont la plupart des grands reptiles.

<sup>2</sup> les deux hypothèses qui paraissent actuellement les plus étayées sont celles de l'impact d'un grand météore et une hyper-activité volcanique

Apparaissent alors les graminées<sup>1</sup>, dont l'importance dans l'alimentation des mammifères (et de l'humanité) est connue.

La composition de l'atmosphère, autre thème d'actualité, atteint les normes contemporaines il y a environ 20 millions d'années. C'est l'époque de la grande diversification des mammifères, qui conduit au premier primate connu de la lignée des anthropoïdes il y a 10 millions d'années, au premier hominidé identifié (l'australopithèque), il y a 3 millions d'années, (...) à l'homo "sapiens néanderthalensis", enfin il y a quelques 120.000 à 200.000 ans à l'homme moderne appelé - avec optimisme - "sapiens sapiens", qui est l'homme actuel.

Le rythme climatique de longue durée, depuis le début du quaternaire (un million d'années) et peut-être avant, est celui des glaciations... Nous sommes actuellement en phase interglaciaire, depuis 12.000 ans. Les espèces animales et végétales connues aujourd'hui sont déjà en place, et l'on assiste à la constitution progressive des grands écosystèmes actuels, puis à la modification de beaucoup d'entre eux à mesure de l'expansion des sociétés humaines. Très progressivement à partir de la fin de la dernière glaciation, et de manière explosive depuis l'avènement de l'ère industrielle, l'humanité est devenue une "force planétaire", d'abord presque aveugle, puis de plus en plus éclairée sur les implications de ses actions...

Après avoir en quelque sorte planté le décor en résumant l'histoire de la biosphère, voyons, en l'état actuel, sa constitution, ses rythmes, ses échanges internes et avec l'extérieur. Les trafics maritimes font partie de ces échanges internes. Pour les retrouver il faut passer par une description rapide mais générale du système.

### **A.1.2.2    ses compartiments : atmo, hydro, litho...sphère**

Lithosphère (milieu minéral solide), hydrosphère (milieu liquide) et atmosphère sont les divisions de base. Les milieux les plus favorables au développement et la reproduction de la vie sont le plus souvent ceux où les trois compartimentages s'interpénètrent de la manière la plus indissociable (la "porosphère")<sup>2</sup>

---

<sup>1</sup> -38 à -26 millions d'années

<sup>2</sup> "partie de l'écosphère où la lithosphère, l'hydrosphère et l'atmosphère se rejoignent et se mêlent intimement. Il s'agit essentiellement des sols en milieux émergés et des sédiments en milieux immersés sous eau douce ou marine. "(Bouché op.cit.p.130)

### A.1.2.3 ses constituants : eau, gaz, solides

#### *l'eau*

Les rôles que joue l'eau dans le fonctionnement de l'écosphère sont multiples. Comme constituant majeur de l'écosphère, elle joue en particulier un rôle primordial, dans ses divers états, dans les échanges énergétiques et matériels de l'écosphère. Comme agent chimique, l'eau intervient dans de multiples réactions, comme oxydant, ou comme réducteur, ou en tant que solvant. Comme constituant de la vie et comme milieu de vie, *en tant que fluide des "milieux internes" des êtres vivants, en tant que véhicule de la plupart des éléments entrant et sortant des systèmes vivants enfin, pour nombre d'entre eux, comme milieu vital*<sup>1</sup>.

#### *les gaz*

Ils constituent l'atmosphère mais sont aussi présents dans les pores des solides, notamment dans les sols, et dans les liquides à l'état dissous. Ils renvoient, on le sait, à la question des climats<sup>2</sup>..

#### *les solides*

Les solides de l'écosphère (ceux qui sont en interaction avec la vie) sont, soit issus directement de la matière constitutive du globe, transformés par des réactions chimiques et des processus physiques ultérieurs, soit produits par les organismes vivants au cours des âges géologiques. Les très importants dépôts de calcaire par exemple sont d'origine biologique.

L'évolution des parties solides de la lithosphère superficielle, et les échanges (limités) entre celle-ci et les couches inférieures sont décrites par la tectonique des plaques. Retenons simplement que les phénomènes volcaniques de grande ampleur peuvent avoir, en ce qui concerne l'émission de gaz à effet de serre et des menaces sur la couche d'ozone, des effets cumulatifs de ceux des effluents gazeux des activités humaines<sup>3</sup>.

### A.1.2.4 ses états : bio- et nécromasse, sols

#### *la biomasse*

A l'échelle d'un écosystème, ou de l'écosphère, le concept de biomasse désigne l'ensemble des organismes vivants<sup>4</sup>.

---

<sup>1</sup> plancton marin notamment (Bouché, op.cit. page 110)

<sup>2</sup> leurs rôles dans les processus chimiques sont trop nombreux et divers pour être résumés ici.

<sup>3</sup> c'est le problème actuellement posé par l'éruption du volcan philippin Pinatubo.

<sup>4</sup> on peut l'utiliser en tant que notion quantitative à n'importe quel niveau de détail, pour évaluer par exemple la masse des mammifères d'un territoire, ou celle des végétaux d'une mare... Ceci pose

### ***la nécromasse***

Les organismes vivants excrètent des matières organiques et meurent. L'ensemble des sous-produits biologiques de la vie constitue la nécromasse. Des organismes vivants appelés "décomposeurs", en utilisant les éléments et l'énergie de ces composants biologiques pour leurs propres besoins, restituent progressivement au milieu les éléments minéraux originaux. Des processus chimiques extra-métaboliques contribuent aussi à cette dégradation. Le cycle est bouclé lorsque les minéraux sont à nouveau disponibles pour nourrir les végétaux autotrophes<sup>1</sup>.

Les constituants de la nécromasse contiennent de l'énergie biochimique. Si cette énergie n'est pas totalement utilisée dans le processus de dégradation, elle peut se trouver stockée pour de très longues durées sous forme de composés carbohydrogénés réduits et de carbone. Des quantités -relativement négligeables en regard de l'activité vitale concernée- en arrivent ainsi à constituer au cours des âges les grands dépôts de lignite, tourbe, charbon, pétrole et gaz que nous connaissons.

### ***le sol***

Les sols sont les lieux principaux de l'échange entre minéral et végétal, donc de constitution des conditions de la production primaire du vivant à partir de la matière minérale et de l'énergie solaire, et de recyclage du végétal vers le minéral.

Le sol est le milieu dans lequel se mêlent le plus intimement le vivant et le minéral, les liquides, gaz et solides. Creuset principal de la vie, c'est aussi le milieu le plus difficile à connaître et à décrire<sup>2</sup>. Les rythmes naturels de constitution des sols sont longs, et très dépendants des climats et du substrat minéral.

*"Les climats actuels marquent profondément le fonctionnement écosystémique, donc la nature des sols, de sorte que les premières classifications pédologiques sont fondées sur cette zonalité pédo-climatique encore évidente (même en sols très remaniés par l'homme) telle*

---

quelques questions d'unités : faut-il mesurer des masses humides ou sèches, le bois est-il aussi "vivant" que les feuilles ? etc...

<sup>1</sup> autotrophe signifie "qui se nourrit par lui-même"

<sup>2</sup> Bouché en parle en spécialiste (op.cit.page 130) : (...) la phase solide inclut intimement des gaz et liquides, les solutions comportent intimement des suspensions, émulsions et gaz dissous et l'air est chargé usuellement à 100 % d'humidité relative d'eau, elle-même véhicule de solutés, etc. Dans les sols la complexité physique des trois phases est maximale. La complexité biologique n'y est pas moindre (...) A sa surface la photosynthèse permet une vie d'autant plus intense que la porosphère contient les éléments biogènes permettant cette vie, y compris l'eau. Réciproquement, la biomasse produit une nécromasse qui devient constitutive de la porosphère au point d'en être parfois la partie dominante. (...) Le sol est le système le plus important (80% des organismes vivants), le plus complexe et le plus opaque à la connaissance humaine

*l'acidification (voire podzolisation) dans les sols des climats froids, l'importance des encroûtements calcaires en climat méditerranéen, des dépôts de monmorillonite (une argile particulière : silicate alumino-ferrifère) en climat sahélien, le développement des encroûtements ferrugineux (latérite) en climat tropical humide enfin, le développement des sols riches en kaolinites sous l'effet des conditions de lessivage important des régions équatoriales*<sup>1</sup>

Les sols cultivés constituent un cas particulier. S'il est exact qu'ils restent marqués par leur "zonalité pédoclimatique", il est aussi évident que leur fonctionnement systémique est profondément modifié, surtout par l'agriculture intensive moderne.

Les sols cultivés sont, sauf exception, issus de la reconversion plus ou moins ancienne de sols d'écosystèmes naturels. Cette reconversion peut être réussie, et servir de support à des agro-écosystèmes relativement stables et robustes, mais l'agriculture industrielle moderne a pris d'autres voies. L'apport massif d'éléments extérieurs a modifié la composition minérale des sols, la lutte chimique contre les organismes animaux et végétaux nuisibles à la plante domestique a atteint une grande partie des décomposeurs, privés par ailleurs de la plus grande part de leur apport en éléments biologiques. La terre est traitée en fin de compte comme une sorte d'éponge ayant le moins possible de vie autonome. Les sols ainsi considérés, diminués dans leurs capacités vitales, peuvent être menacés de régression, voire de disparition.

#### A.1.2.5 biomes terrestres et écosystèmes aquatiques

La description de la répartition planétaire des écosystèmes utilise le concept de biome. Un biome est un type de peuplement global correspondant à un type d'habitat terrestre. Les écosystèmes aquatiques n'ont pas le même genre de détermination spatiale, et le concept de biome n'y paraît pas adapté<sup>2</sup>.

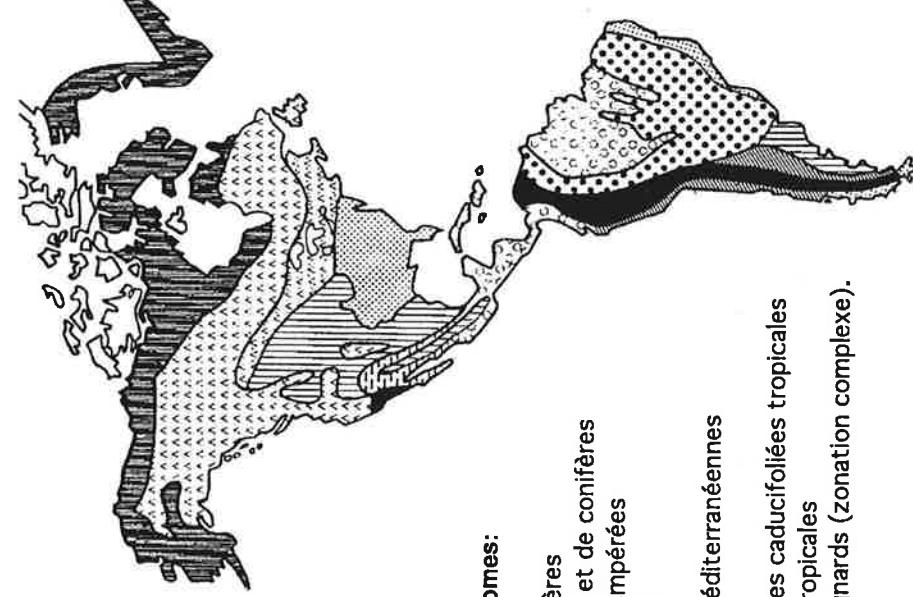
La carte ci-contre présente la répartition des biomes continentaux, commentée page suivante.

---

<sup>1</sup> MILI,OT et al., 1976

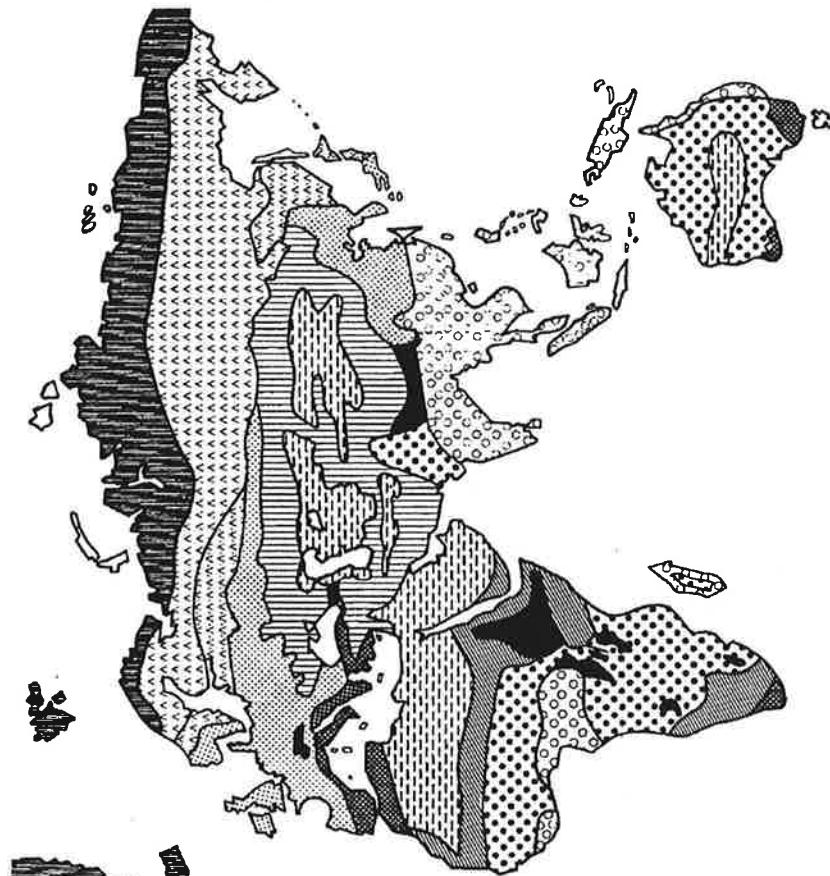
<sup>2</sup> Ramade op.cit. pages 37 à 42 :*dans les océans d'importants courants assurent une certaine homogénéisation des conditions ambiantes, malgré les différences de latitude (...) l'absence de barrières entravant les déplacements des formes vivantes, équivalentes aux déserts, chaînes de montagnes ou étendues marines pour les écosystèmes continentaux, interdit toute zonation latitudinale—à l'exception des récifs coralliens—en milieu océanique.*

# les grands biomes terrestres



## Répartition des grands biomes:

- 1) Toundra
- 2) Forêt boréale de conifères
- 3) Forêt mixte de feuillus et de conifères
- 4) Forêts caducifoliées tempérées
- 5) Steppes graminées
- 6) Déserts
- 7) Forêts sclérophylles méditerranéennes
- 8) Semi-déserts
- 9) Savanes et forêts claires caducifoliées tropicales
- 10) Forêts ombrophiles tropicales
- 11) Ecosystèmes montagnards (zonation complexe).



source : François RAMADE (doc 54)

## **Biomes continentaux**

### **répartition en latitude de l'équateur aux pôles**

"La répartition en latitude des grands biomes terrestres est conditionnée en premier lieu par les climats (...) de l'équateur aux pôles, on observe une certaine symétrie dans la répartition des divers biomes sur chaque hémisphère.

--Les forêts vierges tropicales forment un ruban quasi continu au niveau de la zone intertropicale.(précipitations abondantes et régulièrement réparties au long de l'année)

--Les forêts sèches tropicales leur succèdent dans les zones subéquatoriales (saison sèche prolongée.)

--Les savanes tropicales s'étendent entre les deux tropiques (précipitations insuffisantes pour permettre le développement des écosystèmes forestiers)

--Les déserts, dont le maximum d'extension se situe au niveau des deux tropiques, succèdent aux savanes sans transition nette (faiblesse et forte irrégularité des précipitations)

--Les biomes méditerranéens, très variés et complexes, correspondent à des zones tempérées chaudes (sécheresse estivale excédant souvent trois mois) Aux écosystèmes forestiers primitifs (chênes et conifères) ont succédé, sous l'action conjuguée de la hache et du feu, des formations arbustives dégradées : maquis, garrigues, chaparral.

--Les forêts feuillues caducifoliées caractérisent les régions de moyenne latitude dans l'hémisphère Nord.

--Les steppes tempérées couvrent d'énormes surfaces dans l'hémisphère boréal( précipitations insuffisantes pour assurer la croissance des arbres)

--La taïga, immense forêt boréale de conifères, s'étend sans discontinuité dans l'ensemble des zones subarctiques de l'Amérique du Nord et de l'Eurasie (sols pauvres, précipitations faibles mais régulièrement réparties tout au long de l'année)

--La toundra occupe la région comprise entre la limite naturelle des arbres vers les pôles et les régions parabiosphériques correspondant aux calottes glaciaires arctiques et antarctiques. Le couvert végétal (graminées, lichens, arbustes...) croît sur des sols perpétuellement gelés en profondeur<sup>1</sup>.

## **macroécosystèmes aquatiques**

"Si la zonation en latitude des grands biomes continentaux apparaît de façon très nette, il n'en est plus de même lorsque l'on étudie l'hydrosphère. En effet, par suite de la relative isotropie du milieu aquatique, les facteurs physico-chimiques y varient beaucoup moins et de façon plus lente que sur les terres émergées.

--Les écosystèmes limniques ne présentent aucune zonation latitudinale : on rencontre par exemple des grands lacs depuis l'équateur jusqu'au cercle polaire

--Dans les océans, seules quelques grandes biocénoses présentent une nette zonation en latitude. Tel est le cas des récifs coralliens (zone intertropicale.) dont le développement exige des températures de l'eau élevées

## **zonation en altitude**

La zonation de la biosphère en altitude est encore mieux définie que ses subdivisions en latitude.

--Le domaine océanique s'étend des fosses les plus profondes (—11000 m environ) au niveau 0 . Sa profondeur moyenne est de 3800 m. L'existence du plateau continental, zone marquée par une brusque rupture de pente (talus continental) située vers —200 m, permet de distinguer une province néritique, dont la teneur des eaux en éléments nutritifs varie beaucoup selon les apports fluviaux et d'autres facteurs, et une province

<sup>1</sup> Ramade op.cit. pages 37 à 42

océanique, au large des côtes, dont les eaux présentent une grande constance physico-chimique et dont les fonds s'étendent au-delà de—200 m. Elle occupe une surface égale aux 9/10 de la surface totale de l'océan.

--La zonation verticale des biocénoses terrestres apparaît très nettement dans les régions continentales au relief accusé. A bien des égards, la répartition en altitude des communautés d'êtres vivants s'apparente à la distribution latitudinale des grands biomes<sup>1</sup>

A lire les descriptions qui précèdent, on croirait voir l'état du monde aux âges préhistoriques. Les modifications apportées par l'homme ne sont pourtant pas négligeables :

--remplacement partiel des écosystèmes naturels par des agroécosystèmes<sup>2</sup>

--exploitation "renouvelable" des écosystèmes naturels, qui le supportent, ou régressent, ou évoluent vers des agroécosystèmes

--exploitation destructrice, suivie de mise en culture ou de dégradation pouvant aller jusqu'à la désertification.

L'exploitation des ressources marines va de l'exploitation "renouvelable" à l'exploitation destructrice, les exploitations culturelles étant limitées.

Enfin les activités humaines ont modifié de bien des façons (négatives le plus souvent) l'économie des écosystèmes naturels restant.

La face vivante du monde a changé sur une grande partie de sa surface, ce qui a pu faire croire que la nature "naturelle", désormais contrôlée par l'homme, n'existe plus.

### A.1.3 - ÉCONOMIE GÉNÉRALE DE L'ÉCOSPHERE : L'ÉNERGIE

#### A.1.3.1 L'écosphère : un système énergétique ouvert

L'écosphère peut se définir comme un système thermodynamique ouvert, dont l'énergie vient principalement des radiations solaires<sup>3</sup>. Elle "n'est un système fonctionnel que grâce aux mouvements des divers constituants les uns par rapport aux autres. (... essentiellement l'eau ou l'air). (...) Les échanges gazeux étant souvent globalement non limitants, ce sont les échanges énergétiques (lumière-température) et aqueux qui vont

<sup>1</sup> Ramade op.cit. pages 39-40

<sup>2</sup> systèmes de cultures contrôlées par l'homme

<sup>3</sup> le volcanisme n'est qu'un appoint minime, même si localement ses manifestations sont loin d'être négligeables

essentiellement constituer les facteurs limitants de la biosphère dans la géosphère" <sup>1</sup>. Système énergétique ouvert, l'écosphère est en revanche un système chimique presque fermé, les échanges avec l'extérieur étant relativement minimes.

Parmi les sources exogènes d'énergie de l'écosphère, la source solaire est largement dominante : 5000 fois l'énergie géothermique, 10000 fois l'énergie lunaire<sup>2</sup>. L'apport solaire est évalué à  $15*10^{13}$  kw soit 150 000 milliards de KW<sup>3</sup>, situé essentiellement dans le spectre lumineux et un peu au-delà (ultra-violet). Selon des estimations très variables suivant les auteurs, le flux solaire total a le destin suivant :

- réflexion par les nuages et poussières atmosphériques : 25% à 33%
- accumulation dans l'atmosphère (absorption par nuages et poussières) 15% à 25%
- il en arrive au sol environ 50%, dont environ 10% sont instantanément réfléchis (albedo)

La terre ainsi chauffée a tendance à perdre cette énergie en réémettant des radiations infra-rouges, en partie renvoyées vers le sol par l'atmosphère : c'est l'effet de serre.

Le bilan global, effet de serre compris, rend compte des températures moyennes de la planète et de leurs variations saisonnières et latitudinales. C'est la régularité de ce bilan qui a permis à la vie de s'installer et de se développer depuis quatre milliards d'années.

Une part de ce qui arrive en surface, et de ce qui s'est accumulé dans l'atmosphère, engendre les mouvements des masses d'air et d'eau, les évaporations et condensations, précipitations et autres phénomènes météorologiques constitutifs de la dynamique générale des climats.

Une part enfin, la plus minime, de l'énergie reçue par le système, est utilisée par la vie pour créer la vie. Il s'agit d'une transformation de l'énergie lumineuse en énergie biochimique qui constitue la "production primaire" que nous définirons plus loin.

---

<sup>1</sup> Bouché op.cit.p.109 et 116

<sup>2</sup> L'énergie géothermique, en tant qu'apport énergétique permanent, peut avoir une importance locale, mais elle a surtout son importance dans la structuration et les grands échanges géologiques de la croûte terrestre, via la tectonique des plaques. L'attraction lunaire engendre les marées (conjointement avec l'attraction solaire, beaucoup plus faible), qui exercent leurs effets sur les climats et sur l'écologie des zones importantes pour les cycles vitaux terrestres et marins que sont les régions littorales.

<sup>3</sup> Bouché

### A.1.3.2 climats

Arrivés à cette question ressentie comme cruciale en raison de ses incidences sur de nombreuses activités économiques (énergétiques, agro-alimentaires ...) et de son incidence possible sur les conditions et l'existence même de la vie sur terre, nous sortons du domaine de l'écologie pour entrer dans celui de la climatologie.

Les climats et la vie ne peuvent être traités comme des processus séparés. Les climats de l'écosphère sont autant le produit de la vie qu'une condition déterminante de celle-ci. Ceci est aussi vrai à grande échelle et très long terme que localement et à brève échéance : l'homéothermie de la planète, depuis quatre milliards d'années, ne s'explique pas sans effet en retour de la vie sur les échanges énergétiques<sup>1</sup>; et la disparition d'une forêt, d'un marais, la création d'un lac, font rapidement sentir leurs effets sur le climat local.

La paléoclimatologie fournit des données essentielles sur les évolutions conjointes des températures et des composants de l'atmosphère, et en particulier sa teneur en gaz à effet de serre, notamment en CO<sub>2</sub>. Mais il s'agit de relations statistiques; les causalités sont plus hypothétiques.

La météorologie arrive, avec d'énormes modèles, à décrire les circulations physiques et énergétiques de l'atmosphère avec un pouvoir explicatif suffisant pour des prévisions ne dépassant pas quelques jours. Au delà, ces modèles ont une trop forte "sensibilité aux conditions initiales" pour rester opérationnels.

Entre les deux, la question est très ouverte. De l'explication des grandes glaciations de l'ère quaternaire, à la prévision des conséquences possibles des activités humaines actuelles à l'horizon des décennies ou du siècle à venir, quelle est l'avancée réelle des connaissances et combien de temps faudra-t-il pour que les climatologues en arrivent à des conclusions utilisables ? Les décisions opérationnelles précèdent actuellement de telles conclusions, mais la faiblesse de leurs bases scientifiques peut diminuer leur efficacité de bien des manières.

Ceci pose une question méthodologique majeure, que Bourrelier et Dietrich résument ainsi :

---

<sup>1</sup> l'apport énergétique global solaire à la planète est une variable indépendante, mais sa destinée terrestre dépend d'abord de la composition de l'atmosphère, qui est devenue de plus en plus au cours des âges le produit de la vie, laquelle est dépendante de la structure de l'apport énergétique extérieur

*"La science actuelle, tout en restant déterministe, n'ouvre pas toujours la voie à des prévisions fiables. Les obstacles sont à la fois pratiques et théoriques (...) Du point de vue pratique, la quantité d'informations nécessaires croît considérablement avec la complexité des systèmes (...) Du point de vue théorique, le principe d'incertitude (...) L'évolution climatique à l'échelle des temps géologiques relève bien, semble-t-il, des moyens d'analyse des évolutions chaotiques".<sup>1</sup>*

L'appel à la théorie du chaos, considérée par certains comme "la dernière grande révolution scientifique", paraît justifié mais n'est pas près de donner une solution au problème de la prévision du changement climatique et de ses conséquences. C'est au contraire a priori un diagnostic d'imprévisibilité

Résumons-nous. L'homme réchauffe progressivement le climat, mais les climatologues ne peuvent en prévoir les effets. Ceci influera sur les populations végétales et animales, mais comment les écologues pourraient-ils le calculer, en admettant qu'ils en aient la méthode ? L'évolution des couvertures végétales agira en retour sur les climats, mais comment estimer le retour lorsqu'on ignore l'aller ? Et comment réagirait l'humanité à une dégradation imprévisible de ses conditions de vie et d'alimentation ? Par un freinage ou une course en avant ? Ce qui est en cause, au niveau du sol et des mers, est la productivité vitale des écosystèmes. En l'air, c'est la capacité vitale de l'écosphère entière.

## A.1.4 - PRODUCTIVITÉ ET EFFICACITÉ DES ÉCOSYSTÈMES

### A.1.4.1 production et productivité

Création de vie organisée à partir de la matière -solide, liquide, gazeuse- et de l'énergie -celle du flux solaire-, voilà ce qu'est la production dans l'optique écologique. On précise souvent "production primaire" car on parle aussi, nous le verrons, de "production secondaire" mais avec un sens tout différent.

Les producteurs primaires sont aussi appelés **autotrophes** (qui se nourrit par lui-même). Ce sont par ordre d'apparition les bactéries photosynthétiques, les algues et les plantes chlorophylliennes. Par la photosynthèse, ils fabriquent des substances biochimiques à partir des éléments minéraux et de l'énergie lumineuse. Outre les éléments matériels nécessaires à la vie ces substances contiennent l'énergie

---

<sup>1</sup> "LE MOBILE ET LA PLANÈTE OU L'ENJEU DES RESSOURCES NATURELLES. ", Paul Henri BOURRELIER, Robert DIETHRICH, ECONOMICA, PARIS, FRANCE, 1989 - fiche n°119.

biochimique que vont utiliser les organismes vivants pour leurs besoins propres.

Sur cette base s'est constituée la pyramide des organismes appelés **hétérotrophes** (qui se nourrissent des autres), qui tirent leur substance des autotrophes ou d'autres hétérotrophes. Parmi ceux-ci une catégorie particulièrement intéressante boucle le cycle, celle des **décomposeurs**, qui retroussent les substances biochimiques en éléments minéraux, utilisables à nouveau par les autotrophes. A ce stade, l'énergie initiale est entièrement utilisée.

Dans sa définition la plus générale, la productivité est la relation quantitative entre le produit et les facteurs utilisés pour le réaliser. Dans ses utilisations les plus courantes, c'est une relation entre la description du produit -sur la base d'un critère au moins- et d'au moins un des facteurs de production. Chaque calcul a la signification que lui confère le choix des critères et des facteurs. On rencontre ainsi en écologie plusieurs types de calcul, dont chacun a son intérêt. Les concepts de production et productivité peuvent être maniés à tous les niveaux, à commencer par l'individu, mais la logique écologique amène à chercher leur signification et leur mesure au niveau des écosystèmes.

La production, quantité de biomasse créée, pourra être mesurée en masse de matière organique, en quantité d'énergie contenue dans cette matière, en quantité de carbone fixé, en masse d'acides nucléiques contenus... Les facteurs de production le plus généralement considérés sont l'énergie (flux solaire) et la surface occupée<sup>1</sup>. Lorsque cela est possible, on distingue production brute et production nette, déduction faite de ce qu'ont utilisé les organismes vivants pour leurs besoins propres.

La notion de **productivité primaire** est claire, celle de **productivité secondaire** est plus complexe, et mène à l'étude de l'efficacité des écosystèmes et à la question fondamentale de la diversité du vivant.

Voyons les applications concrètes de ces divers calculs, en évoquant à chaque stade les systèmes de cultures contrôlées par l'homme, que les écologues appellent "**agroécosystèmes**", ou parfois "**agrosystèmes**".

---

<sup>1</sup> la période retenue est généralement l'année, du fait du caractère saisonnier des processus.

#### A.1.4.2 efficacité des écosystèmes

La production secondaire est la transformation d'une partie de la biomasse des autotrophes (végétaux) en biomasse des hétérotrophes. Elle a donc, par rapport à la production primaire, le caractère d'une consommation. Consommateurs ou décomposeurs, ceux-ci ne font que transformer des matières organiques produites en amont. Une part de l'énergie absorbée est consommée par les besoins de leur métabolisme, le reste finit à la "nécromasse" où les décomposeurs terminent la minéralisation. Une fois le cycle bouclé, le compte énergétique et le bilan matières sont nuls pour un écosystème équilibré, positifs ou négatifs si l'écosystème est en expansion ou en régression. Il existe des stockages au niveau de la nécromasse, de durée courte (augmentation ou diminution de l'humus) ou beaucoup plus longue si une partie de la nécromasse n'est pas complètement re-minéralisée<sup>1</sup>. Il faut en outre tenir compte des échanges entre écosystèmes qui ne sont pas forcément équilibrés à tout moment, des prélèvements (supportables ou destructeurs) effectués par l'homme sur les écosystèmes naturels, enfin des apports d'énergie et de matières aux agroécosystèmes, suivis du prélèvement systématique de la plus grande part de la biomasse créée. Tout ceci paraît complexe, mais peut se concevoir en termes comptables simples. : l'addition - sur un cycle ou une année - des productions primaire et secondaire d'un écosystème donne un total nul, sauf croissance ou décroissance de l'écosystème, et sauf apports et prélèvements extérieurs. L'important - en matière comptable - est de ne pas se tromper de signe.

Que signifie donc cette idée de mesure de l'efficacité des écosystèmes ? Les écologues s'attachent à la complexité du vivant, à la hiérarchie des niveaux d'organisation et surtout au fonctionnement global de systèmes vivants. C'est la vision de l'écosystème "en soi". Mais on peut aussi considérer l'écosystème "pour soi" et s'intéresser à la part de sa production qui peut être prélevée au profit d'une partie privilégiée des hétérotrophes, l'humanité par exemple. S'il s'agit d'un système cultivé, l'homme peut se comporter en producteur secondaire intérieur à l'écosystème, dans lequel il recycle ses propres effluents - c'est l'autosubsistance, ou la part d'autosubsistance, agricole -. Il peut aussi (ou en plus) se comporter en agent extérieur, et dans ce cas son prélèvement devra être modéré ou compensé par un apport extérieur d'énergie et de matière. C'est apparemment un choix imposé par l'urbanisation, dès qu'elle se développe<sup>2</sup>.

---

<sup>1</sup> ainsi se sont constitués en des millions d'années les dépôts carbonés et hydrocarbonés

<sup>2</sup> mais on peut imaginer des sociétés urbaines organisées sur un comportement écologique de systèmes de production secondaire, restituant leurs déchets sous forme dégradable aux agroécosystèmes producteurs.

Les écologues, centrés a priori sur l'étude de l'écosystème "en soi", peuvent être amenés à adopter la seconde optique et évaluer par exemple ce qu'il faut de production primaire pour amener un kilo de bœuf ou une truite dans leur assiette<sup>1</sup>.

A grande échelle, c'est la question de l'alimentation humaine planétaire qui peut être intéressée par la mesure de l'efficacité des écosystèmes, mais aussi du coût en production primaire des divers modèles de consommation primaire et secondaire possibles. Nous revenons ainsi à notre sujet.

#### A.1.4.3 notion de pyramide écologique

Chaque espèce se situe sur une ou des chaînes alimentaires, dont le premier maillon est un producteur primaire (autotrophe) et le dernier un décomposeur. Ceci amène les écologues à décrire l'économie d'un écosystème sous la forme simplifiée de pyramides, où les espèces sont classées par niveaux. Chaque niveau du vivant s'alimente au niveau inférieur et sert d'aliment au niveau supérieur avec, à chaque étage, des consommations internes d'énergie. Il y a aussi des retours directs de matière au sol, alimentant le niveau terminal des décomposeurs.

Selon ce que l'on veut décrire, on peut bâtir des pyramides de nombres d'individus, de biomasses, d'énergie et mesurer ce qu'il faut dépenser pour obtenir une quantité donnée (en nombre, masse, énergie...) au niveau supérieur. C'est une mesure d'efficacité partielle, qui peut répondre à une question précise, par exemple : "quelle est la modification d'un écosystème qui permet d'augmenter le nombre de truites, ou d'hommes, ou d'araignées... et aux dépends de quoi ?..."

Ces pyramides sont illustratives et se prêtent à des estimations quantitatives, mais la réalité est plus complexe. Ainsi beaucoup d'espèces ont un mode d'alimentation dominant et des modes secondaires ou accidentels qui leur permettent de s'alimenter à plus d'un niveau de la pyramide. Certaines sont omnivores et ce sont souvent les plus performantes en termes de survie - c'est le cas de l'espèce humaine.

Terminons sur une idée relativement simple, qui est qu'à chaque niveau la déperdition d'énergie est énorme, de l'ordre de 90%. Très

---

<sup>1</sup> Ramade, op.cit. p.279 : "L'efficience des transferts d'énergie varie beaucoup d'une chaîne alimentaire à l'autre: il faut 80 kg d'herbe verte pour obtenir 1 kg de bœuf mais seulement 5 kg de viande pour produire 1 kg de truite dans une pisciculture. "

approximativement, cela signifie que pour 1 kw de carnivore il faut que les autotrophes végétaux aient produit 100 kw (nourrissant 10 kw d'herbivores), à partir (nous l'avons vu) de 1.000 kw d'énergie captée sur un flux solaire de 10.000 kw arrivant au sol !

#### A.1.4.4 les trois mesures

En résumé, nous avons décrit deux types de mesure de l'efficacité vitale des écosystèmes, plus une troisième qui est celle de leur efficacité pour l'homme.

La productivité primaire est le premier indicateur, quantitatif, de la capacité de l'écosystème à utiliser l'énergie solaire. Indication simple si on le rapporte au flux solaire, à peine plus complexe si on le rapporte à la surface occupée (dont l'ensoleillement dépend au premier chef de la latitude). Intervient dans les deux cas le filtrage de l'atmosphère, qui dépend en partie de paramètres généraux, en partie de l'écosystème lui-même. La mesure la plus rigoureuse de la productivité primaire est le rendement énergétique (énergie biochimique produite sur énergie solaire reçue ou utilisée).

La production secondaire est le résultat de l'utilisation de la production primaire par les hétérotrophes. En termes d'énergie biochimique, elle est simplement égale à la production primaire dans le cas d'un écosystème stable. Ce qui mesure l'efficacité vitale d'un écosystème n'est donc pas le bilan énergétique, qui à terme est nul. C'est la quantité de matière vivante, en d'autres termes la biomasse. Plus la "pyramide" des hétérotrophes est importante et complexe, plus la biomasse totale s'accroît. La productivité secondaire est en relation directe avec la diversité.

A ces appréciations de l'efficacité vitale des écosystèmes s'ajoute une troisième qui est celle de leur efficacité agroalimentaire, mesure du prélèvement possible ou effectif pour l'homme. On voit comment la question de savoir comment nourrir l'humanité en expansion dans les prochaines décennies passe par la recherche des moyens d'augmenter le prélèvement alimentaire sans diminuer la productivité globale de l'écosphère. Au travers de la mesure de l'efficacité de diverses configurations productives, c'est la structure d'ensemble des trafics maritimes agro-alimentaires qui peut se trouver modifiée. Mais les critères quantitatifs que nous venons d'examiner ne sont pas les seuls.

### A.1.5 - LA DIVERSITÉ DU VIVANT

Nous avons déjà évoqué la question de la diversité du vivant, fondement même de la vie, et de l'existence des animaux supérieurs auxquels nous appartenons. C'est une situation globale, dans laquelle il est vain de distinguer des espèces "utiles" et "inutiles", voire "nuisibles".

La vie actuelle constitue une sorte de pyramide dont la base est constituée par les formes les plus élémentaires, semblables à celles qui ont les premières colonisé les eaux, puis les terres émergées. Un écosystème naturel doit sa capacité de vie et de reproduction à cette complexité. Les agroécosystèmes les mieux contrôlés par l'homme sont encore trop complexes pour que l'on sache formuler complètement - encore moins imiter ou reproduire - les interrelations entre espèces qui s'y déroulent.

La disparition d'une espèce est d'une manière générale irréversible. Les espèces animales terrestres les plus évoluées ont quelques millions ou dizaines de millions d'années, mais leurs origines (les "phylas") remontent à la "nuit des temps" de la vie terrestre<sup>1</sup>.

La disparition annuelle de quelques espèces n'est rien, dans les conditions naturelles. Elle est compensée par de nouvelles, la disparition accidentelle d'un grand nombre d'espèces pouvant faire la place au développement d'autres plus performantes, tels les mammifères (et la plupart des espèces animales et végétales actuelles) succédant aux reptiles (et à la plupart des espèces animales et végétales anciennes) après le désastre d'il y a 65 millions d'années. Mais un tel processus est fondé sur une diversité des solutions de remplacement possibles, qui n'est pas illimitée en raison de l'ancienneté des origines.

Le mode de sélection et d'élimination pratiqué par l'homme depuis des milliers d'années, et qui prend actuellement une fantastique accélération, est fondamentalement différent des processus naturels. Alors que ceux-ci paraissent à chaque étape aller vers des stades de complexité supérieurs, l'action humaine est essentiellement simplificatrice et réductrice.

Le cas des forêts est un exemple caractéristique de cette tendance. Les bois constituent à première vue des productions stockables d'énergie et

---

<sup>1</sup> selon une théorie récente, la grande différenciation des phylas animaux remonterait au Cambrien, il y a plus de 500 millions d'années ("UN "BIG BANG" ZOOLOGIQUE AU CAMBRIEN - inclus dans: LA RECHERCHE - N°240 - 2/92 , Armand DE RICLES, PARIS, FRANCE, - sur les thèses de S.J.GOULD - in "la Recherche", 2/92. fiche n°447

de matériaux dont les cycles sont à l'échelle humaine. Exploiter systématiquement les forêts permet de conserver une couverture boisée importante, siège d'une exploitation rationnelle, préservant les sols et basée sur les espèces se reproduisant le mieux et le plus vite, adaptées aux besoins humains. Remplacer les exploitations destructives actuelles par des cultures rationnelles de bois est donc envisageable, mais revient à remplacer progressivement les écosystèmes forestiers par des "agroécosystèmes boisés" producteurs de bois.

Or une plantation d'arbres n'est pas plus une forêt qu'un tas de cailloux n'est une mosaïque. La forêt est un écosystème complexe, qui se reproduit et évolue... De même que la mosaïque peut porter un message rare et ancien, la forêt porte en elle le message de la diversité du vivant, des producteurs primaires aux décomposeurs en passant par toute la complexité des formes de vie animales et végétales.

Les forêts des zones nordiques et tempérées sont en partie récentes, elles ont commencé à se reconstituer après la fin de la dernière glaciation, il y a 10 à 12000 ans. Les forêts tropicales sont plus anciennes. En plus de la disparition d'espèces, qui est irréversible, la disparition des écosystèmes forestiers en tant que tels est difficilement réversible à l'échelle historique.

La question de la diversité ainsi illustrée, à partir des forêts, ne s'y limite évidemment pas. C'est l'ensemble des zones naturelles qui est concernée, et en particulier les plus riches sur le plan vital, telles que zones humides, plateformes littorales, estuaires, zones coraliennes... Dont bien souvent, comme dans le cas des forêts, la richesse vitale va de pair avec la pauvreté économique, ce qui favorise les exploitations destructives ou la liquidation au profit d'agrosystèmes simplifiés. Mécanisme général et phénomène courant, du marais poitevin à la forêt brésilienne, en passant par le dynamitage des coraux indonésiens pour la production de matériaux de construction <sup>1</sup>.

La diversité des espèces domestiques, végétales et animales, est une variante de la question précédente, plus directement reliée aux intérêts visibles de l'humanité. Il s'agit d'un patrimoine dont les délais de constitution sont millénaires, et la reconstitution d'autant plus difficile que les espèces sauvages d'origine peuvent avoir disparu. La constitution de conservatoires ou banques de gènes et de semences n'est qu'un

---

<sup>1</sup> "QUAND L'INDONESIE SE MET A PARLER D'ENVIRONNEMENT ", Eve-Lucie BOURQUE, ACDI (ag.canad.develop.interna, QUEBEC, CANADA, 1991, in "Québec Science", 9/91 - fiche n°116

palliatif, dans la mesure où il s'agit généralement d'espèces liées à des conditions locales et pratiques culturelles reproductibles, mais difficilement stockables. C'est d'ailleurs la question du renouvellement des espèces domestiques qui a commencé fait prendre conscience de l'intérêt humain à la préservation d'un minimum de diversité sauvage. En fin de compte, la prise de conscience de l'importance de la diversité du vivant est de nature à poser avec une acuité nouvelle la nécessité de préserver les écosystèmes naturels qui subsistent.

## A.1.6 - ÉCONOMIE DE LA MATIÈRE : LES GRANDS CYCLES

### A.1.6.1 l'économie cyclique de la matière

Le cycle vital, nous l'avons vu, part du minéral, est transformé en biologique par les producteurs primaires, puis décomposé pour retour au minéral. Les éléments ainsi récupérés sont le plus souvent disponibles pour entrer dans un nouveau cycle vital.

*"Il existe une circulation cyclique de la matière dans chaque écosystème qui résulte de la complémentarité écophysiologique entre autotrophes et hétérotrophes. (...) Carbone, hydrogène, oxygène, azote, phosphore, soufre et une trentaine d'autres corps simples, indispensables à l'édification de la cellule vivante, sont sans cesse transformés en matières biochimiques (glucides, lipides, acides aminés, etc.) ou absorbés sous forme d'ions inorganiques par les végétaux autotrophes, puis utilisés par les hétérotrophes : animaux puis microorganismes dégradeurs. Ceux-ci décomposent (...) détritus en éléments minéraux hydrosolubles ou en composés gazeux qui retournent dans le sol, les eaux et l'atmosphère. (...) A l'échelle de la biosphère, on désigne sous le terme de cycles biogéochimiques ce passage alternatif des éléments entre milieu inorganique et matières vivantes et dont les diverses phases se déroulent au sein des écosystèmes. (...) L'existence de tels cycles confère à la biosphère un pouvoir considérable d'autorégulation lequel assure la pérennité des écosystèmes*

<sup>1</sup>

A l'échelle des écosystèmes, même très stables, les cycles biogéochimiques ne sont pas totalement fermés. On constate des entrées et sorties de matières en direction d'autres écosystèmes, et du milieu non-vivant. On constate également des équilibrages dans le temps, stockages et déstockages à des échelles diverses. A l'échelle de l'écosphère, la résultante de tous ces cycles est analysable produit par produit, au niveau des grands biomes et du bilan global. La plupart des cycles sont remarquablement équilibrés, au moins sur des durées relativement courtes.

---

<sup>1</sup> Ramade op.cit.pages 236 et suite

Sur des échelles de temps très longues, les stockages et déstockage entre le vivant et le non-vivant, ainsi que des transferts à sens uniques déterminent les évolutions plus générales : mobilisation progressive des roches superficielles dans les processus biochimiques, évolution de la composition de l'atmosphère, etc. Sur des durées plus limitées, mais encore séculaires ou millénaires, on constate des évolutions au niveau des grands biomes qui peuvent être dues à l'action locale combinée des déséquilibres des cycles biochimiques et des climats.

Les agroécosystèmes aménagés par l'humanité relèvent de la même analyse. Les systèmes agricoles "traditionnels" stables<sup>1</sup> étaient fondés sur des cycles reproduisant ou imitant les équilibres des écosystèmes naturels. Les systèmes agricoles nés de la révolution industrielle, et qui continuent à s'étendre, fonctionnent au contraire sur des cycles ouverts au maximum : apports minéraux massifs et sortie à l'autre extrémité de matières (solides, liquides, gazeuses) non recyclées dans le processus vital concerné. On retrouve même en sortie directe une partie des intrants qui n'ont fait que passer sans entrer dans les processus vitaux et ne sont pas récupérés<sup>2</sup>.

Comment s'organisent à l'échelle de l'écosphère les cycles des éléments les plus importants pour la reproduction et le développement de la vie ? Nous décrirons l'économie générale des cycles, et non le détail des processus, qui sont d'une grande complexité.

#### A.1.6.2 le cycle de l'eau

L'eau n'est pas une matière rare<sup>3</sup>. Pour la vie marine, l'eau n'est évidemment pas un facteur limitant. En revanche l'eau douce libre (hors calottes glaciaires) est limitée. Le cycle de l'eau douce, indispensable à

<sup>1</sup> c'est-à-dire en dehors de phases de grands défrichages ou de surexploitation culturelle

<sup>2</sup> nous touchons ici encore directement à l'économie de certains des principaux trafics terrestres et maritimes mondiaux, et indirectement à beaucoup d'autres. L'économie des flux de matière des autres activités humaines, de type urbain et industriel notamment, est malheureusement hors champ pour les écologues, sauf à prendre en compte certains de leurs effets lorsqu'ils menacent les équilibres écologiques.

<sup>3</sup> La répartition de l'eau est très approximativement la suivante (selon Hutchinson, 1957, d'après Ramade).

Localisation ou forme	Volume en millions de km <sup>3</sup>
Océan	1 380
Roches sédimentaires	210
Calottes glaciaires	16,7
Eaux souterraines	0,25
Eaux continentales de surface	0,025
Vapeur d'eau atmosphérique	0,013

la vie terrestre, passe par la très faible quantité relative de vapeur d'eau atmosphérique. La majeure partie de cette vapeur retombant directement dans les océans, c'est moins du cinquième de cette quantité qui intéresse le cycle biochimique terrestre. La vapeur d'eau provient de deux sources principales, l'évaporation exercée par le flux solaire et l'évapotranspiration des organismes vivants, les plantes principalement. Cette dernière participe à la circulation générale, mais aussi à une alimentation "de proximité" des écosystèmes, qui peuvent ainsi à la limite fonctionner en circuit presque fermé<sup>1</sup> Le cycle de l'eau se poursuit par précipitations, ruissellement de surface, infiltration, absorption sous toutes ses formes par les organismes vivants.

Les organismes vivants les plus simples peuvent être équipés pour supporter des pénuries prolongées ou constituer leurs propres stocks. Les animaux et végétaux supérieurs ont besoin, sauf cas extrêmes, d'être branchés en continu sur le cycle de l'eau (à quelques heures, jours ou semaines près). Il faut des stocks pour passer les variations saisonnières et les sécheresses relatives.

Le cycle de l'eau comporte des "stocks", en surface ou dans la texture du sol, en nappes souterraines, en glaciers, etc. L'économie des eaux souterraines est mal connue, mais on sait qu'elles constituent un important stock à terme moyen du cycle de l'eau douce (le grand stock à long terme étant sous forme de glace). Or ce stock est fortement sollicité par des prélèvements humains (notamment pour l'agriculture), menacé par les pollutions, et ses capacités de reconstitution diminuées par les changements climatiques, enfin l'érosion modifie en bien des régions les circuits de l'eau<sup>2</sup>. L'eau douce, qui n'est un facteur limitant des écosystèmes que dans les régions les plus arides de la planète, risque de le devenir d'une manière bien plus générale au siècle prochain.

---

<sup>1</sup> c'est le cas des grands bassins forestiers tropicaux humides, dont le défrichage étendu peut être l'amorce d'un processus inéluctable de désertification.

<sup>2</sup> un des facteurs qui font la gravité du problème est ici encore la médiocre connaissance scientifique des processus, sous leur aspect quantitatif et prévisionnel du moins.

### A.1.6.3 le cycle du carbone

Parler du cycle du carbone, c'est revenir à l'histoire de la vie sur terre. L'économie actuelle de son cycle n'a été atteinte qu'au terme de 99% du temps de cette histoire. C'est là aussi que la relation directe entre cycle biochimique et équilibres climatiques est maximale. C'est là enfin que le développement par l'humanité d'un "cycle ouvert" fondé sur la mobilisation des stocks carbonés fossiles introduit le déséquilibre général le plus évident, et le plus rapide.

*"Le carbone est présent dans la nature sous deux formes minérales prépondérantes, à l'état de carbonates, roches calcaires d'origine biogène qui constituent d'immenses dépôts et surtout à l'état gazeux, de CO<sub>2</sub>. C'est aux dépens de ce gaz carbonique atmosphérique que les végétaux autotrophes assurent toute la production primaire des continents émergés. (...). Un autre réservoir joue un rôle régulateur dans la circulation du gaz carbonique : l'océan, dont la teneur en CO<sub>2</sub> dissous est équivalente à 50 fois la masse totale du CO<sub>2</sub> atmosphérique. (...) Dans les eaux continentales, cet acide carbonique dissous peut attaquer les roches superficielles. Dans le cas des carbonates, comme le calcaire par exemple, il se produit une remise en circulation du calcium sous forme de bicarbonate, soluble dans l'eau (...) Ce dernier est amené dans les océans par les eaux superficielles de ruissellement (...) Les immenses dépôts sédimentaires de divers carbonates proviennent de l'incorporation du calcium dans les formations squelettiques de divers animaux pendant de longues périodes géologiques.*

*Deux phénomènes biologiques fondamentaux conditionnent la circulation du carbone dans la biosphère : la photosynthèse et la respiration. La respiration, qui consomme de l'oxygène et dégage du gaz carbonique dans des proportions équimoléculaires, n'est pas seulement le fait des autotrophes et des hétérotrophes animaux. Dans chaque écosystème, les substances organiques résiduelles -détritus- subissent une dégradation oxydative tandis que les fermentations décomposent partiellement des substrats dans des conditions anaérobies avec dégagement de gaz carbonique.*

*En milieu terrestre (...) les matières organiques ne sont pas entièrement minéralisées mais transformées en un ensemble complexe de composés organiques acides formant l'humus. (...) qui joue un rôle fondamental dans la rétention et la circulation des sels minéraux nutritifs et est donc un agent essentiel de la fertilité des sols. Ces matières organiques s'accumulent dans diverses formations sédimentaires. (...) C'est ainsi que se sont constitués les formidables dépôts de charbon, de pétrole et autres hydrocarbures fossiles ou de calcaire en milieu aquatique, ce qui représente une forme de stagnation du cycle du carbone.*

*(...) Depuis le début du quaternaire jusqu'à la société industrielle moderne, le cycle du carbone dans la biosphère était pratiquement parfait. La plupart de la production primaire annuelle était décomposée par la respiration des autotrophes et hétérotrophes et le gaz carbonique rejeté compensait de façon quasi rigoureuse la quantité de gaz carbonique retirée de l'atmosphère par la photosynthèse. (...) L'homme, depuis une date récente, a inversé le sens de ce phénomène puisqu'il utilise comme combustible des masses de plus en plus importantes d'hydrocarbures fossiles, ce qui enrichit l'atmosphère en gaz carbonique<sup>1</sup>*

---

<sup>1</sup> Ramade p.243 à 248

Malgré les inquiétudes suscitées par l'épuisement de certaines réserves énergétiques, on peut avancer que le carbone est actuellement le contraire d'un facteur limitant. Il est abondant dans la lithosphère (sauf sous forme énergétiquement utilisable). Dans l'atmosphère, sous forme de dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>), sa proportion ne peut être augmentée sans risque majeur pour la vie, par l'intermédiaire du climat. C'est un facteur à limiter sévèrement et non un facteur limitant.

#### A.1.6.4 le cycle de l'oxygène

L'histoire de l'oxygène sur terre, en relation avec la vie, est en quelque sorte le pendant inverse de celle du carbone. Les cycles actuels de l'un et de l'autre sont de la même manière fait de mouvements contraires.

*L'oxygène apparaît quantitativement comme le principal constituant de la matière vivante.<sup>1</sup> (...) il était absent de l'atmosphère terrestre primitive, ce sont les organismes autotrophes qui l'ont élaboré. (...) Le cycle de l'oxygène s'effectue en majeure partie entre l'atmosphère et les êtres vivants. A sa production et son dégagement sous forme gazeuse lors de la photosynthèse, s'oppose sa consommation par les hétérotrophes lors de la respiration qui conduit à la dégradation des molécules organiques et au transfert de l'oxygène sur l'hydrogène qui a été enlevé aux substrats avec formation d'eau. Le cycle de l'oxygène apparaît donc comme l'image inversée de celui du gaz carbonique, les mouvements de l'un s'effectuant dans le sens opposé de ceux de l'autre. (...) Actuellement, photosynthèse et respiration, dans les conditions naturelles et si l'on exclut l'action de l'homme, sont rigoureusement équilibrées, de sorte qu'il ne se produit plus d'accumulation d'oxygène dans l'atmosphère et que le taux d'oxygène libre demeure constant.<sup>2</sup>*

L'oxygène, du point de vue des grands cycles biochimique, n'est en fin de compte ni limité, ni limitant, ni à limiter. Seule sa forme ternaire, l'ozone (O<sub>3</sub>), pose deux sérieux problèmes dûs aux activités humaines : augmentation dans les basses couches de l'atmosphère, et à l'inverse diminution dans la stratosphère, ce dernier risque étant de beaucoup le plus grave.

#### A.1.6.5 le cycle de l'azote

L'azote, sous forme de nitrates, est indispensable à la vie. Sous diverses formes, c'est un élément abondant dans la biosphère.

---

<sup>1</sup> Ramade p.248 à 250 "Si l'on tient compte de l'eau présente dans les tissus, le corps humain par exemple renferme 62,8% d'oxygène et 19,4 % de carbone. Si l'on se rapporte à l'ensemble de la biosphère, cet élément figure encore au premier rang des corps simples devant le carbone et l'hydrogène".

<sup>2</sup> Ramade p.248 à 250

### *Le cycle de l'azote...*

*"est certainement un des cycles les plus complexes et les plus parfaits à la fois. (...) A la différence du gaz carbonique, l'azote ne peut être utilisé tel quel que par un nombre restreint d'organismes. (...) certaines catégories d'organismes, et elles seules, sont aptes à intervenir à chaque phase de ce cycle.*

*Le principal réservoir d'azote est l'atmosphère (...) L'azote gazeux y fait sans cesse retour sous l'action des bactéries dénitritifiantes, tandis que les bactéries fixatrices de ce gaz et les cyanophycées (algues bleues) en absorbent continuellement et le transforment en nitrates<sup>1</sup>.*

En résumé, l'azote n'a rien d'un facteur limitant. Le problème est le déséquilibre du "cycle parfait" que décrit Ramade, par apport aux systèmes agricoles de quantités de nitrates qui ne peuvent être recyclées vers l'atmosphère. Il s'ensuit une accumulation progressive, dans les sols et eaux douces (notamment les nappes phréatiques) et les eaux marines littorales, qui déséquilibre les écosystèmes en favorisant certaines formes de vie aux dépends d'autres.

Pour les animaux supérieurs et l'espèce humaine, l'excès de nitrate dans les eaux est toxique. C'est donc et ce sera de plus en plus un facteur à limiter.

### **A.1.6.6 le cycle du phosphore**

Autre élément indispensable à la vie, le phosphore offre le cas - exceptionnel - d'un cycle biochimique naturel partiellement ouvert. Le phosphore minéral, élément relativement rare, existe principalement sous la forme de phosphates sédimentaires. Son cycle semble poser un problème assez grave, et relativement peu connu.

*Le stock de phosphore disponible pour les êtres vivants est entièrement contenu dans la lithosphère.*

*(...)*

*un élément rare dans la biosphère dont il ne constitue que 1 % de la teneur totale en corps simples; il tend de ce fait à devenir un facteur limitant primordial dans de nombreux écosystèmes dont il conditionne ipso facto la productivité. Ce phosphore inorganique est mis en circulation par lessivage et dissolution dans les eaux continentales. Il est ainsi introduit dans les écosystèmes terrestres et absorbé par les végétaux qui l'incorporent dans diverses substances organiques*

*(...)*

*Puis les phosphates organiques sont restitués au sol avec les cadavres, déchets et excreta produits par les êtres vivants, attaqués par les microorganismes et retransformés en orthophosphates minéraux, à nouveau disponibles pour les plantes*

*(...)*

*Le phosphore est introduit dans les écosystèmes aquatiques par les eaux de ruissellement. Les fleuves fertilisent sans cesse les océans par déversement perpétuel dans ces derniers de leurs*

---

<sup>1</sup> Ramade p. 250

eaux riches en phosphates. Elles permettent ainsi le développement du phytoplancton et des animaux situés aux divers niveaux des chaînes trophiques limniques ou marines.

(...)

Malheureusement, on constate que le cycle du phosphore est incomplet et ouvert si l'on suit le cheminement de cet élément à l'échelle de la biosphère.

En effet, si le cycle du phosphore dans les écosystèmes terrestres s'effectue de façon optimale avec un minimum de pertes par lessivage dans les conditions naturelles, il n'en est pas de même dans les océans. Cela résulte de la sédimentation incessante des matières organiques et en particulier des cadavres de poissons, riches en phosphore, dont les fragments qui ne sont pas consommés par les détritiphages et les décomposeurs s'accumulent sans cesse au fond des mers. Alors que les phosphates organiques particulaires déposés en eaux peu profondes des zones intertidales et néritiques peuvent être remis en circulation après minéralisation, il n'en est pas de même pour ceux qui se sédimentent au fond des zones abyssales. Or celles-ci représentent, rappelons-le, 85 % de la superficie océanique totale. Les phosphates déposés dans les grands fonds marins sont de la sorte retirés de la biosphère et ne peuvent plus être recyclés.

(...)

La surrection des chaînes de montagne ramène très lentement à la surface des continents émergés les sédiments accumulés au fond des géosynclinaux. Cependant, leur cycle, si tant est qu'il est fermé, s'effectue sur des périodes géologiques, c'est-à-dire sur des dizaines, voire des centaines, de millions d'années.

(...)

à l'échelle de la biosphère et sur une période courte, le cycle du phosphore n'est pas entièrement ouvert. Il se produit en effet un retour partiel des phosphates des océans vers les terres émergées. Celui-ci s'effectue surtout par l'intermédiaire des oiseaux de mer ichtyophages. Les gisements de guanos péruviens attestent de l'importance qu'a pu revêtir ce phénomène par le passé dans certaines zones continentales.

(...)

dans les conditions naturelles, les transferts de phosphore des océans aux continents sont tout à fait insuffisants pour compenser les pertes dues à la sédimentation. En outre, l'homme renforce de nos jours cette tendance naturelle par l'épandage de fertilisants phosphatés sur les terres cultivées.

(...)

La rareté du phosphore dans la lithosphère et l'importance de son rôle écologique rendent fort préoccupante l'action de l'homme sur son cycle biogéochimique.

(...)

Le phosphore constitue le principal facteur limitant pour les organismes autotrophes tant en milieu aquatique qu'en bien des biotopes terrestres. Cet élément contrôle ainsi la majeure partie de la production primaire de la biosphère. Il est fort probable, en conclusion, que le phosphore soit le grand régulateur de tous les autres cycles biogéochimiques. Le taux de nitrates dans les eaux ou celui d'oxygène dans l'atmosphère apparaissent en définitive contrôlés par le cycle du phosphore. Ainsi, comme le souligne Duvigneaud (1967) : "La situation pourrait devenir un jour angoissante car l'on peut écrire avec Wells, Huxley et Willes (1939) que le phosphore est le maillon le plus faible dans la chaîne de vie qui permet l'existence des hommes." <sup>1</sup>

La question est ainsi clairement posée depuis plus d'un demi-siècle, mais rarement évoquée en ces termes.

---

<sup>1</sup> Ramade p.257 à 259

Le phosphore, indispensable à la vie, serait donc un facteur rare dont les ressources éparses ne se renouvellent que partiellement. Elles diminuent progressivement, mais à quel rythme ? Si c'est un (ou "le") facteur limitant pour l'ensemble de la vie sur terre, cette limitation ne pourra que devenir de plus en plus contraignante. En attendant une solution il conviendrait de gérer avec parcimonie les stocks miniers de phosphates, ce qui n'est pas le cas.

Ce gaspillage d'une ressource rare à long terme est en même temps cause de graves déséquilibres par excès dans les écosystèmes aquatiques, de sorte que la partie des effluents de phosphates qui vient des nettoyants est en voie de limitation. La modification des techniques de production agricole est un autre problème, plus global.

Il est donc possible que la question du phosphore, déjà à l'ordre du jour à propos des pollutions phosphatières, devienne un thème majeur en raison d'une pénurie croissante limitant progressivement les capacités vitales de l'écosphère. Ceci concerne directement les trafics phosphatiers, mais touche plus indirectement à l'ensemble des trafic agro-alimentaires.

### A.1.6.7 le cycle du soufre

Le soufre entre dans la composition de certains acides aminés essentiels dans la structure des protéines. On le trouve sous diverses formes dans la lithosphère (sulfates, pyrites...) et dans l'atmosphère (hydrogène sulfuré SH<sub>2</sub>, anhydride sulfureux SO<sub>2</sub>). Les sulfates de la lithosphère sont la principale source de soufre utilisable par les organismes vivants. Solubles dans l'eau pour la plupart, ils sont absorbés et transformés par les plantes.

Il ne semble pas que le cycle biogéochimique du soufre pose actuellement de problème<sup>1</sup>

### A.1.7 - CONCLUSION

La présentation très éclatée que nous venons de faire de l'écosystème vise à permettre, dans les phases suivantes du travail, de situer les trafics maritimes mondiaux et/ou les activités humaines qui les engendrent en relation avec les phénomènes planétaires qui les conditionnent, ou les limitent, ou les incluent. Par exemple le titre 2.1.6, sur les cycles, permet de situer les trafics d'engrais bruts et manufacturés, le titre 2.1.4 les transferts de produits énergétiques, etc. Beaucoup de trafics sont à relations multiples, tels les produits alimentaires aux grands biomes, aux climats, à la démographie... Mais cette approche systémique permet de poser le problème en dynamique, et non plus seulement comme un réseau de contraintes limitantes, de voir les effets positifs aussi bien que les négatifs, et les effets en retour. Du moins c'est ce que nous essayerons de faire, car il ne suffit pas de poser un problème correctement pour en avoir la solution, et les bases scientifiques de cette approche sont aussi inégales que leur exploitation difficile.

Il nous reste à intégrer l'humanité dans cette approche globale, et ce ne sera pas le plus facile.

---

<sup>1</sup> ce qui ne signifie pas que les effluents soufrés atmosphériques n'en posent pas, mais c'est un autre sujet: anhydride sulfureux=>pluies acides=>déforestation

## A.2 - SOCIO-ÉCONOMIE ET ÉCOLOGIE HUMAINE

### A.2.1 - QUESTIONS ET RÉPONSES

#### A.2.1.1 questions planétaires courantes

Les sociétés industrielles ont vécu longtemps dans l'idée que sciences et techniques, alliées au dynamisme économique, ne manqueraient pas d'apporter les solutions à tous les problèmes posés par leur propre développement. L'absence de réflexion scientifique sur "l'homme dans la planète" est largement imputable à cette vision.

La constatation directe par les individus et groupes sociaux de la dégradation croissante de leur environnement, jointe à l'avancée de la réflexion écologique, a été bien souvent à l'origine d'un changement de perspective.

Un premier doute plus général est venu de la prise de conscience des conséquences planétaires de la période dite des "30 glorieuses"<sup>1</sup>. Il a été exprimé dès 1972 dans le premier rapport publié par le Club de Rome<sup>2</sup>, sous le titre de "the limits to growth", encore connu sous le nom de "rapport Meadows". Mais la fin de la croissance-miracle, survenue quelques années plus tard, n'a rien réglé. Il apparaît maintenant que les conséquences mondiales des trente années de croissance soutenue, puis de la crise qui a suivi, auront des implications écologiques fortes, bien qu'encore difficiles à évaluer. Les effets accumulés durant la même période dans les pays du bloc soviétique, dont l'ampleur n'est pas encore exactement connue, ne sont sans doute pas moindres.

Une autre interrogation majeure est celle du "développement". Résoudre le décalage croissant entre pays dits "plus développés" et "moins développés" paraissait simple aux premiers temps de la décolonisation. Il s'agissait de profiter de la forte dynamique des premiers pour enclencher chez les seconds un processus identique, visant à les amener en quelques décennies au niveau des premiers. C'est la théorie du "démarrage" et des

<sup>1</sup> expression introduite par Jean Fourastié pour désigner les trois décennies de croissance exponentielle des pays industrialisés de l'après-guerre

<sup>2</sup> "HALTE A LA CROISSANCE - le club de Rome - rapport Meadows ", Janine DELAUNAY, Donella H. MEADOWS, Dennis L. MEADOWS, Jorgens RANDERS, Club de Rome, FAYARD, PARIS, FRANCE, 1972 - fiche n°421

"phases du développement économique" des années 50 et 60, qui connaît depuis quelques succès localisés et un échec global. Echec bien venu par ailleurs, car son succès général aurait vraisemblablement compromis gravement les conditions de la vie sur terre. Il n'y a pas actuellement de politique de remplacement à celle du modèle classique de développement, mais la question est posée. C'est le thème du développement soutenable, "développement qui répond aux besoins du présent, sans compromettre la capacité des générations futures à répondre des leurs", tel qu'il a été formulé par la Commission Mondiale sur l'Environnement et le Développement de l'ONU en 1988<sup>1</sup>.

On en arrive ainsi à identifier trois situations de crise, crise de la croissance dans les pays riches, crise du développement dans le tiers monde, crise écologique à l'échelle planétaire. Une quatrième situation spécifique de crise s'y est ajoutée récemment, celle de la reconversion à l'économie de marché des pays de l'ex bloc soviétique.

Ces crises sont liées, et la recherche des solutions est loin d'être évidente. Il s'agit tout à la fois d'un débat scientifique et d'un véritable problème de société, posé à l'échelle mondiale, dans lequel la relation entre écologie, croissance et développement apparaît de plus en plus évidente.

Tel est en bref le contexte ambigu dans lequel nous essayerons néanmoins de dégager les lignes de force d'évolutions futures possibles, à partir des réflexions et travaux actuellement disponibles.

Tout ceci remet en question les principales tendances qui ont présidé à la croissance des grands courants du commerce international, et du trafic maritime, depuis un bon demi siècle, et dans lesquels les progrès réalisés dans les techniques et modes d'organisation du transport maritime ont été un des vecteurs essentiels de cette évolution générale.

---

<sup>1</sup> La publication en 1988 du rapport de la Commission Mondiale sur l'Environnement et le Développement (Rapport connu sous le nom de Rapport Brundtland. Il a été publié en anglais en sous le titre "Our common future", en français sous le titre "Notre avenir à tous" - fiche n°122), lançait la notion de "Développement Soutenable", ou "Durable" (Sustainable Development), dans la définition citée. Associé à la discussion sur les changements climatiques, ce concept a favorisé l'émergence d'une prise de conscience des problèmes d'environnement. Il apportait un éclairage nouveau sur les problèmes planétaires, et faisait officiellement l'interface entre développement économique et environnement. Actuellement cette notion fait l'objet d'une certaine surenchère, mais reste fondamentale dans un travail de prospective comme le notre, car elle est d'emblée axée sur le long, voire le très long terme.

### A.2.1.2 recherche des réponses théoriques

Nous le verrons, l'ensemble des disciplines habituellement groupées sous la dénomination de "sciences de l'homme" n'intègre le plus souvent les facteurs non-humains que sous des formes "humanisées" : ressources, cadres de vie, symboles, "environnement"... La relation entre ces disciplines et les sciences "planétaires" de la nature paraît difficile à établir. Celles-ci, nous l'avons vu déjà, ont du mal à intégrer les sociétés humaines dans leur approche.

*Le clivage homme/nature, qui se situe à un niveau beaucoup plus fondamental, est responsable de ce hiatus scientifique majeur - et dans une large mesure des atteintes concrètes à l'environnement.*

D'un côté comme de l'autre, on ne voit pas très bien où peuvent être les disciplines de synthèse permettant d'appuyer une prospective. Ceci n'est toutefois qu'une situation générale, au sein de laquelle nous allons rechercher les travaux particuliers et réflexions susceptibles de nous faire avancer.

L'illusion de la prise en main de la nature par l'homme, bien que largement battue en brèche, reste tenace. Une chose est de constater que bien peu d'écosystèmes n'ont pas été modifiés par l'action de l'humanité ; une autre est de s'imaginer qu'il n'y a plus sur terre que des systèmes artificiellement créés par l'homme (ou presque). Cette dernière vision ne repose sur aucune formulation scientifique permettant de tracer une frontière entre choses ou activités "naturelles" et "artificielles".

En revanche l'analyse des modalités et intensités de l'influence humaine sur tel ou tel système permet d'opérer des classements plus opérationnels, et de réintégrer les systèmes les plus "humanisés" dans le cadre de l'analyse des relations physiques de l'écosphère. Une ville, par exemple, est un système vivant en relation permanente avec d'autres systèmes locaux ou généraux..

Toutefois la pensée scientifique semble rester marquée par ce clivage. Entre les économistes (encore minoritaires) qui cherchent à introduire un peu de nature dans leurs mécanismes, et les écologues (peu nombreux) qui veulent mettre l'humanité dans leur système, nous avons du mal à voir apparaître des visions globales susceptibles d'éclairer le long terme. Nous essayerons quand même, quitte à formuler nous-mêmes ce que nous n'avons pas trouvé par ailleurs

### A.2.1.3 y a-t-il une réponse pragmatique ?

Le Programme HDGC (Human Dimensions of Global Change) porte sur les causes et les conséquences humaines des changements de l'environnement planétaire, dont les dimensions physiques et biochimiques sont étudiées dans le cadre du Programme International sur la Géosphère et la Biosphère (PIGB) des Nations Unies. C'est donc un cadre approprié à la recherche de la formulation de la situation planétaire de l'humanité. John B. Robinson<sup>1</sup> résume comme suit la question posée et les axes méthodologiques initiaux.

*p.673 et suite*

#### *Les interactions entre systèmes naturels et humains*

*(...) s'interroger explicitement sur les articulations entre les systèmes naturels auxquels s'intéresse le PIGB et les systèmes humains qui, tout à la fois, contribuent à créer les changements de l'environnement planétaire et en subissent les effets. Il importe cependant de bien voir que l'étude des systèmes naturels et celle des systèmes humains doivent en général être abordées de manière assez différente. Il semble en découler que l'étude des relations entre ces systèmes se prête aussi à des approches assez différentes. Tel est le défi méthodologique lancé par le Programme HDGC : élaborer des méthodes d'analyse qui intègrent, en leur rendant justice, les riches traditions conceptuelles, théoriques et méthodologiques associées aux disciplines fort diverses mises à contribution par le Programme. Il est peu probable que l'on puisse relever ce défi en se contentant d'additionner les résultats des études qui se rattachent aux différentes traditions de la recherche. Il ne suffit pas non plus de recourir aux méthodes traditionnelles pour étudier, par exemple, les relations entre environnement et économie. Ces approches sont trop marquées par les disciplines dont elles proviennent. On leur préférera une approche plus globale et interdisciplinaire, fondée en outre sur la reconnaissance explicite de la perspective dans laquelle doit se situer l'analyse.*

*(...)*

#### *La modélisation des systèmes humains*

##### *Pourquoi une approche de processus physiques ?*

*Il a été suggéré ci-dessus que l'analyse des systèmes humains dans le cadre du Programme HDGC devrait reposer sur une distinction entre deux catégories d'activités humaines : celles qui sont décrites en termes physiques et celles qui sont décrites en termes de comportement sociopolitique. Etant donné que cette conception de la modélisation des systèmes humains s'écarte très nettement de celle qui est généralement de mise en économie, où les modèles sont conçus précisément pour articuler des informations physiques et comportementales, il est bon de préciser certaines des raisons de cette suggestion. Tout d'abord, nous l'avons vu, l'analyse des dimensions sociales des changements de l'environnement planétaire doit pouvoir aborder explicitement l'articulation biophysique entre systèmes humains et naturels. Cela exige des modèles de systèmes humains qui soient capables de décrire en termes quantitatifs les flux de matière et d'énergie entre ces systèmes et les systèmes naturels. Or, la plupart des modèles économétriques ne comportent aucune représentation explicite des processus physiques; ils se limitent aux comportements humains en matière de production et de consommation définis sous l'angle économique (c'est-à-dire monétaire). Deuxièmement, l'un des buts importants de cette analyse étant d'explorer des architectures des relations entre systèmes humains et naturels qui peuvent être très différentes des rapports caractéristiques du passé, il importe qu'elle puisse s'affranchir des relations passées entre*

---

<sup>1</sup> "la modélisation des interactions entre systèmes humains et naturels - John B. ROBINSON, UNESCO, Erès, PARIS, FRANCE, in "Rev.Internat.Sciences Sociales", 11/91 - fiche n°.192

variables clés. Il est tout aussi important que les nouvelles architectures et les nouvelles relations analysées soient matériellement possibles.

(...)

Les problèmes à résoudre pour modéliser les interactions entre systèmes humains et naturels sont donc considérables. Heureusement, il semble que l'importance de ces interactions soit de mieux en mieux reconnue. Les arguments exposés ici font ressortir l'intérêt, en matière de modélisation, d'un cadre conceptuel qui permette d'intégrer leur analyse à d'autres recherches utiles pour le Programme HDGC.

#### **Modélisation et études prospectives**

Tout modèle conçu de manière à porter sur les interactions entre systèmes humains et naturels doit pouvoir servir à une analyse à long terme (vingt à cent ans) puisque, aussi bien, la plupart des processus environnementaux qui nous préoccupent et des réponses nécessaires, de la part de la société, pour éviter ou atténuer une dégradation de l'environnement s'inscrivent dans la durée. En d'autres termes, le modèle doit couvrir une période suffisamment longue pour autoriser le renouvellement des stocks tant environnementaux qu'humains. Les problèmes qui doivent être abordés dans le cadre du Programme HDGC et des autres projets de recherche pareillement axés sur l'environnement ne sont pas seulement à horizon lointain : ils sont aussi complexes et porteurs de lourdes incertitudes. Dans ces conditions, les modèles utilisés doivent se prêter aussi à une analyse non prévisionnelle ...

Ce n'est qu'un exemple, mais à notre avis significatif. Les objectifs sont clairs, les moyens restent obscurs. La formulation du modèle ne semble pas reposer sur des bases théoriques bien définies, des bases méthodologiques seulement, et c'est bien autre chose. Un modèle pragmatique de relations entre des systèmes de logiques aussi différentes, voire opposées, court deux risques : soit de n'être qu'un vaste bricolage, dont rien ne permettra d'apprécier la signification, soit de subir la dynamique du système intellectuellement dominant, qui est indiscutablement l'économique. Le glissement paraît ainsi très probable, de la recherche d'une formulation socio-écologique originale, à la réalisation d'un modèle économique plus classique.

Ce n'est qu'un exemple entre beaucoup. Indépendamment des chercheurs, de nombreux organismes de compétence locale ou sectorielle formulent des problématiques tendant à concilier de manière pragmatique économie et écologie. Il est certain que de telles formulations sont nécessaires, mais peu indicatives des modalités de résolution à plus long terme des problèmes posés ici.

#### A.2.1.4 conclusion initiale

Il y a évidemment tout une gamme de réponses théoriques et pragmatiques aux "questions planétaires" que nous avons définies pour commencer, et dont la justification par les nécessités d'action immédiate ne fait pas de doute. Nous avons seulement voulu souligner que nous n'en avons pas trouvé qui donnent une formulation d'ensemble permettant d'éclairer le long terme.

Nous avons ensuite collecté, étudié et critiqué les diverses modalités suivant lesquelles les disciplines socio-économiques essaient d'intégrer la nature, et les disciplines écologiques l'humanité. Le sujet est trop large et nos moyens trop étroits pour prétendre à l'exhaustivité. Nous chercherons seulement à mettre en évidence, sur des exemples significatifs, les tendances principales. Cette étude va nous amener à approfondir la réflexion théorique sur les compatibilités et incompatibilités réelles entre les mécanismes socio-économiques et écologiques, réflexion indispensable pour aller plus avant...

A ce niveau de la réflexion, les incidences sur les trafics maritimes sont le plus souvent trop indirectes pour être précisées sans alourdir le texte. Nous reviendrons plutôt sur cet aspect de la question dans la conclusion générale.

### A.2.2 - POINTS DE VUE SOCIO-ÉCONOMIQUES SUR LA NATURE

#### A.2.2.1 lacunes des économistes ou limites de l'économie de marché ?

De sa première formulation générale par Adam Smith à nos jours, et dans ses multiples branches, la théorie économique ignore les processus naturels<sup>1</sup>. Elle est avant tout la formulation de la manière dont les valeurs monétaires s'accroissent en se reproduisant.

D'Adam Smith à Karl Marx, tous les économistes classiques mettent le concept de production sous la dépendance absolue de la reproduction du capital, voire de la plus-value. La marchandise n'est plus qu'une forme transitoire du capital, permettant à celui-ci de se multiplier. Des deux termes constitutifs de la marchandise, valeur d'échange et valeur

---

<sup>1</sup> ce qui n'était pas le cas des théories antérieures, dont aucune d'ailleurs ne se définissait uniquement comme "économique".

d'usage, seul le premier entre dans le calcul. La valeur d'usage n'est considérée par eux qu'en tant que condition d'existence d'une valeur d'échange.

Leurs successeurs ont fait un pas de plus en négligeant de plus en plus cette condition primordiale, ce qui revient à évacuer du calcul économique de la production la matérialité (ou la réalité) du produit. En fin de compte, dans les comptabilités économiques actuelles, la logique est inversée : c'est l'existence d'une valeur d'échange qui fait supposer que le produit ou service possède une valeur d'usage. Ceci est le premier obstacle conceptuel à l'introduction des processus physiques concrets, qui sont "en amont" de la constitution de la valeur d'usage, plus loin encore que celle-ci du calcul économique.

Un second obstacle réside dans les principes de détermination du prix, ou de la valeur d'échange pour rester dans les termes classiques.

Le travail humain, sous ses diverses formes présentes et passées, détermine en première instance la structure des prix. Ce qui fait le prix d'un quintal de blé n'est en aucune façon le processus de "production primaire" naturel, de création de matière vivante à partir du minéral et de l'énergie, mais d'abord la somme des efforts humains consacrés à orienter cette production vers des besoins sociaux solvables.

La seconde détermination éventuelle de la structure des prix est la rareté des facteurs de production, dits "naturels", c'est-à-dire indépendants à priori du travail humain. Il s'agit seulement de raretés immédiates ou à court terme : les prix sont à peu près indifférents à des risques de pénurie à long terme.

La troisième détermination éventuelle des prix vient de la "rente foncière", sous les multiples formes, rente minière par exemple, qu'engendrent les modalités d'appropriation de l'espace par l'homme.

(restent les mécanismes bien connus de l'offre et de la demande, mais ce sont des mécanismes d'ajustement et nous n'en discuterons pas ici)

Notons que là où l'espace n'est pas approprié, par nature ou par convention<sup>1</sup>, les biens sont a priori gratuits, et seuls des risques évidents de dégradations ou raréfaction peuvent - dans les conditions

---

<sup>1</sup> la liste en est longue, on peut citer l'atmosphère, les eaux courantes, les océans et mers hauturières et ce qui y vit, l'Antarctique, le sous-sol dans certains pays dont le nôtre, le sol dans quelques autres, la Lune... L'ouvrage d'Alexander Kiss cité plus loin contient des analyses approfondies des statuts juridiques nationaux et internationaux des différents types de biens.

d'un droit international encore mal assuré<sup>1</sup> - mettre des freins à leur exploitation, très tardivement en général. Mais de telles barrières n'impliquent pas forcément la création d'un prix du facteur concerné, dans la mesure où il n'y a personne pour l'exiger d'après un droit de propriété.

La question de la gratuité des ressources naturelles prend tout son sens dans le contexte des "trois crises" que nous avons évoqué précédemment<sup>2</sup>. De la situation coloniale, dans laquelle les principaux pays industrialisés avaient la disposition des ressources de leurs empires respectifs, on est passé après la dernière guerre, avec la phase finale de la décolonisation, à l'internationalisation généralisée de ces ressources. Les entreprises des pays industrialisés ayant l'usage de ces ressources et les moyens de les exploiter sur une large échelle, leur mise en valeur s'est faite dans des conditions de prix correspondant à un prélèvement foncier relativement très modique. Les moyens de transport (maritime notamment) ont suivi ce changement d'échelle, les installations productives aussi. Les économies des pays dominants se sont extraverties en conséquence, et les processus d'extraction, mais aussi de récupération et recyclage industriels qui existaient sur leur sol ont régressé devant cette manne de matières à bas prix. Ceci est une des explications du dynamisme exceptionnel des "trente glorieuses". Les économies des pays sous-développés, bien plus extraverties encore, ont vu les termes de l'échange se dégrader lentement. Les espoirs de développement ont fait long feu, et les ressources naturelles se sont englouties de plus en plus à seulement payer le fardeau d'une dette croissante. Le premier rééquilibrage général des prix d'une matière première (pas n'importe laquelle, puisqu'il s'agit du pétrole) a amorcé la crise générale de la croissance des pays développés, approfondi la crise de développement dans le tiers-monde. La crise écologique n'a pas été résolue pour autant.

Lois de la valorisation, de la croissance, des "grands équilibres" financiers, autant de mécanismes qui imposent leurs exigences à toutes les échelles, du local à l'international. Le respect de ces exigences est par ailleurs très relatif, et dépend des situations géopolitiques et rapports de force, mais une telle relativité peut créer des phénomènes incontrôlables. En fait l'ensemble du mécanisme économique est d'autant plus mal contrôlé que les théories économiques en cours sont perpétuellement dépassées par des évolutions imprévues.

---

<sup>1</sup> "L'ECOLOGIE ET LA LOI ", Alexandre KISS, Roland CARBIENER, Stéphane DOUMBE-BILLE, Jérôme FROMAGEAU, CNRS-Min Envir, L'Harmattan, PARIS, FRANCE, 1989 - fiche n°181.

<sup>2</sup> cf infra titre 2.2.1

Le modèle économique actuel est en crise, rappelons le, sur deux axes majeurs, blocages de la croissance dans les pays développés, échecs du développement dans les autres. D'où sa grande difficulté à intégrer les composantes de la troisième crise qui se développe, la crise écologique mondiale. Mais si croissance et développement se mettaient par miracle à s'épanouir, la crise écologique deviendrait rapidement critique...

En résumé, le système économique dit "de l'économie de marché" ne semble pas receler de réponse théorique (ni pratique ?) adaptée aux trois axes de crise exposés précédemment. C'est néanmoins lui qui assure le fonctionnement courant de la société humaine planétaire, sans alternative visible.

Faute d'alternative, y a-t-il des ajustements possibles et suffisamment efficaces ? c'est ce que nous allons examiner maintenant.

### **A.2.2.2   élargir ces limites pour intégrer l'écologie ?**

Mettez donc de l'écologie dans votre économie. C'est la thèse suivant laquelle la prise de conscience des problèmes d'environnement va permettre de compléter progressivement les mécanismes économiques par des correctifs écologiques suffisants, y compris au niveau des mécanismes internationaux. On espère en plus que cela va peut-être, en engendrant des activités nouvelles, contribuer à relancer la croissance. En tout cas, les premiers à s'y lancer seront bien placés dans la compétition économique à venir...

C'est la thèse courante, et c'est à son début d'application que nous assistons actuellement. La présentation simplifiée que nous en faisons la rend un peu caricaturale, mais elle correspond, nous l'avons déjà dit, à une nécessité immédiate et incontestable. Le problème posé en théorie dès maintenant, et que nous allons examiner, est celui de son réalisme à long terme.

Comment et jusqu'à quel point peut-on enrichir les mécanismes économiques par la valorisation de certaines composantes de l'environnement ? Lorsqu'il s'agit de réparer les dégâts, le principe "pollueur-payeur" est maintenant admis (sinon appliqué) très généralement<sup>1</sup>. Lorsqu'il s'agit de donner un prix à des ressources

---

<sup>1</sup> ce principe, qui paraît le plus évident, recèle un effet pervers tout aussi évident, si payer confère le droit de polluer. C'est le payeur-pollueur, illustré par l'apparition récente aux Etats Unis d'un marché des transactions sur les "droits à polluer" institués en fait par le Clean Air Act fédéral.

naturelles non renouvelables, ni la théorie ni la pratique économique ne fournissent de solution cohérente et applicable. Lorsqu'il s'agit de choses qui ne peuvent s'analyser en termes de "ressources", c'est-à-dire en tant que marchandises actuelles ou même futures, le système de pensée économique paraît tout à fait en défaut et s'évade dans les méandres d'enquêtes de motivation et d'analyses statistiques multicritères aussi respectables que hors sujet.

Quel est donc le sujet ? C'est au minimum la survie et la qualité de la vie de l'humanité dans les temps futurs, ce que l'on commence à appeler le "droit des générations futures", dans des temps qui (il faut l'espérer) se comptent en siècles, millénaires, et plus, et non en années et dizaines d'années. Ne voir que des temps aussi brefs, pour une espèce qui compte déjà au moins 120.000 années d'existence, serait effectivement suicidaire.

En résumé, le calcul économique présente quelques inaptitudes à intégrer les composantes écologiques fondamentales. En outre, par le jeu de l'actualisation, il dévalorise complètement le futur lointain. Enfin, pour certains, ce n'est pas seulement le calcul économique qui est mal adapté à la prise en compte de l'environnement naturel, c'est le système économique qui est, dans son principe même, anti-écologique. Ainsi André Gorz<sup>1</sup> le formule comme suit, avec une remarquable concision :

(p. 91-92)

*...l'impératif économique de rendement est fondamentalement différent de l'impératif écologique de ménagement. La rationalité écologique consiste à satisfaire les besoins matériels au mieux, avec une quantité aussi faible que possible de biens à valeur d'usage et durabilité élevées, donc avec un minimum de travail, de capital et de ressources naturelles. La recherche du rendement économique maximal, en revanche, consiste à vendre avec un profit aussi élevé que possible un maximum de productions réalisées avec le maximum d'efficacité, ce qui exige une maximisation des consommations et des besoins. Seule cette dernière permet la rentabilisation de quantités croissantes de capital. La recherche du rendement maximal à l'échelle de l'entreprise conduit, par conséquent, à l'échelle de l'économie, à des gaspillages croissants. Mais ce qui, du point de vue écologique, apparaît comme du gaspillage et de la destruction de ressources est perçu, du point de vue économique, comme source de croissance : la concurrence entre les entreprises entraîne une cadence élevée des innovations, le volume des ventes et la vitesse de circulation du capital augmentent grâce à l'obsolescence, au renouvellement plus rapide des produits. Et ce qui, du point de l'écologie, apparaît comme une économie (durabilité des produits, prévention de maladies et d'accidents, moindre consommation d'énergie et de ressources) fait baisser, avec le PNB, la production de richesses économiquement mesurables et apparaît, sur le plan macro-économique, comme une source de pertes.*

---

<sup>1</sup> "CAPITALISME SOCIALISME ECOLOGIE - Désorientations Orientations ", André GORZ, Galilée, PARIS, FRANCE, 1991 - fiche n°477

La dernière question sur laquelle nous voulons revenir est celle de la prise en compte de l'espace, traduite en termes économiques par celle de la "rente foncière", que Bourrelier et Dietrich<sup>1</sup> commentent comme suit :

p.108

*Au sens original, la rente foncière concerne les terrains mis en culture : c'est le revenu prélevé sur le fermier par le propriétaire. Mais les analyses peuvent être transposées aux autres rentes ou plus-values liées au sol ou au sous-sol et qui, aujourd'hui, sont d'une importance au moins aussi grande : plus-values des terrains urbains et rente minière par exemple.*

*J.L. Guigou , en présentant l'évolution des théories depuis 1650 jusqu'à nos jours, les regroupe en fonction des thèmes qui ont successivement dominé les analyses. Il distingue ainsi :*

*1. Les premières théories caractérisées par le fatalisme naturel : il s'agit des précurseurs tel Vauban des physiocrates, d'Adam Smith et de Malthus. Pour ces penseurs, la rente foncière est un don gratuit de la nature, conforme à l'ordre naturel qui est aussi moral et religieux. La propriété foncière est un droit naturel, et elle peut servir de base à l'impôt.*

*2. Les théories classiques qui rattachent la rente au développement agricole. Les deux fondateurs en sont Ricardo et Marx. Selon leur conception, qui est naturaliste et reste une base de l'analyse actuelle, la rente comprend une composante différentielle qui résulte de l'inégalité des productivités face à l'unicité des prix des produits agricoles; à cette composante s'ajoute, selon Marx, une rente absolue de monopole qui résulte de la rareté des terres.*

*3. D'autres auteurs, comme Marshall, ont ensuite analysé les rentes de situation qui résultent des transports, de la localisation de l'activité, des travaux d'aménagement.*

*4. Les néo-classiques (par exemple Maurice Allais) ne distinguent pas la terre des autres facteurs de production et définissent sa valeur dans le cadre de la théorie générale de l'équilibre économique.*

*Il faut enfin ajouter à ces travaux les recherches, à diverses époques, sur la propriété ou la nationalisation du sol, l'impôt foncier, la gestion du patrimoine foncier.*

*Ces travaux et débats passionnés, qui sont nés dès que la raréfaction de la terre s'est fait sentir, traduisent l'attachement des hommes au sol et le caractère crucial des problèmes fonciers. En comparaison, la rente minière a donné lieu à beaucoup moins de controverses et d'études théoriques, ce qui est surprenant car le partage ou la confiscation (en tenant compte de la fiscalité) de la rente pétrolière et de quelques rentes minières est au cœur de bien des conflits géopolitiques actuels.*

Dans l'ouvrage d'où est tiré cette citation, les auteurs cherchent avec beaucoup de compétence à reformuler la question des ressources dans le cadre de mécanismes économiques respectant les équilibres planétaires. Avec le développement des sociétés humaines, la question de l'espace devient cruciale, et risque de l'être de plus en plus. Devant cette question, la théorie économique reste muette, car elle est fondamentalement a-spatiale. Peut-on ramener un espace écologique à trois dimensions à une rente monétaire unidimensionnelle ? L'économie concrète le fait, la théorie économique le masque...

---

<sup>1</sup> "LE MOBILE ET LA PLANÈTE OU L'ENJEU DES RESSOURCES NATURELLES. ", Paul Henri BOURRELIER, Robert DIETHRICH, ECONOMICA, PARIS, FRANCE, 1989 - fiche n°119.

### **A.2.2.3 conclusion économique**

Si les "sciences de l'homme" ne peuvent parvenir (en leur état actuel) à intégrer la nature dans leurs approches, peut-être les écologues ont-ils les moyens d'intégrer l'humanité dans les leurs ? c'est ce que nous allons examiner maintenant.

## **A.2.3 - POINTS DE VUE ÉCOLOGIQUES SUR LA SOCIÉTÉ**

### **A.2.3.1 limites de l'approche écologique, ou lacunes des écologues ?**

Une approche écologique n'a pour limites que celles du système étudié, qui est ici l'écosphère. L'ensemble des activités humaines en fait évidemment partie. Les limites qu'adoptent ou acceptent les écologues sont de nature disciplinaire, pas de nature écologique...

Conformément au parti méthodologique de cette phase exploratoire de la recherche, nous avons cherché dans les publications disponibles les travaux permettant d'étayer une approche écologique des activités humaines. Le champ est trop vaste et multidisciplinaire pour que nous ayons l'assurance de l'avoir bien couvert, mais la maigreure des résultats nous paraît néanmoins significative. Nous avons trouvé quelques exposés intéressants sur le plan méthodologique, mais pratiquement pas de travaux réellement exploitables dans ces termes sur le plan quantitatif.

Nous avons vu que l'approche écologique permettait de commencer à poser les questions dans un cadre propice à la recherche d'une cohérence... Commencer seulement, dans la mesure où un grand nombre de trafics ne paraissent pas entrer dans les préoccupations générales des écologues, soit qu'ils ne posent pas de problèmes majeurs, soit qu'il ne soient pas engendrés par des écosystèmes (naturels ou cultivés) identifiables. C'est le cas des trafics industriels et commerciaux n'ayant pas de rapport direct avec l'agriculture ni avec l'énergie.

Nombre d'écologues arrivent maintenant à introduire dans leur analyse les agroécosystèmes, non sans discussion. Dans ce cas, l'homme néanmoins reste très extérieur, même l'agriculteur, qui est beaucoup plus considéré comme un agent extérieur que comme un constituant du système.

Les autres activités humaines de toute nature (production, consommation, déplacements, occupation d'espace...) ne sont prises en compte qu'en tant que facteurs exogènes de déséquilibrages écologiques. Ceci constitue très certainement un frein intellectuel à la recherche de solutions originales aux problèmes actuels.

La réflexion sur le sujet existe cependant. La question est en tout cas posée depuis longtemps, comme le rappelle Jean Paul Deléage<sup>1</sup> : "inclure l'humain dans les flux et les reflux du monde vivant conçu comme une totalité, voilà qui fut dès l'origine et qui demeure - plus que jamais - une question essentielle, lancinante et des plus controversée de la science écologique". Nous examinerons ci-après les types de réponses recensées par Deléage à diverses époques, avant d'exposer les tendances actuelles.

### A.2.3.2 les premiers écolo-économistes

Avec une anticipation remarquable, il y a un bon siècle que les questions que nous évoquons ici ont commencé à être formulées, avant d'être oubliées pour longtemps. Jean Paul Deléage (op.cit) résume ainsi ce mouvement :

p.67 à 71 (extraits)<sup>2</sup>

(...) à la fin du XIX<sup>e</sup> siècle se multiplient les recherches qui tentent d'élucider les rapports de l'homme à la nature : elles vont en effet de la critique des modes industriels d'exploitation des ressources naturelles à la perspective de constituer un savoir positif susceptible de les rationaliser. Deux noms illustrent particulièrement ces recherches : celui de Patrick Geddes et celui de Serge Podolinsky.

(...) Podolinsky rappelle les lois de distribution de l'énergie dans l'univers et en particulier la constance du flux solaire qui balaie la terre, avant d'affirmer que, jusqu'à un certain degré, « il est dans le pouvoir de l'humanité de produire certaines modifications dans cette distribution de l'énergie solaire, de façon à en rendre une plus grande portion profitable aux hommes... ». Car l'homme, poursuit Podolinsky, "par certains actes de la volonté, peut augmenter la quantité d'énergie solaire accumulée sur la terre et diminuer la quantité dispersée". Pour atteindre ce but, il s'agit avant tout d'étendre et d'améliorer l'agriculture et, d'une façon plus générale, la productivité biologique de la nature. Podolinsky effectue un bilan énergétique de l'agriculture française, le premier qui en ait jamais été fait (...) Quel phénomène démultiplie donc ainsi l'énergie humaine ? Podolinsky constate que tous les

<sup>1</sup> "HISTOIRE DE L'ECOLOGIE - une science de l'homme et de la nature ", Jean-Paul DELEAGE, LA DECOUVERTE, PARIS, FRANCE, 1991.- fiche n°134

<sup>2</sup> références données par J.P.Déléage sur ces extraits

PODOLINSKY Serge, "Le socialisme et l'unité des forces productives" *La Revue socialiste*, n° 8, Paris, 1880.

MARTINEZ-ALIER.1., *Ecological Economics*. Oxford, Basil Blackwell, 1988

GEDDES Patrick, « An Analysis of the Principles of Economics », *Proceedings of the Royal Society of Edinburgh*, les 17 mars, 7 avril, 16 juin et 17 juillet 1884, reproduits par William et Norgate, Londres, 1885.

*mouvements de l'air et de l'eau empruntent l'essentiel de leur énergie au soleil et l'affinité chimique elle-même, accumulée sous forme de houille dans les entrailles de la terre, est également un produit du rayonnement solaire passé. Ainsi, deux processus énergétiques sont en compétition dans le monde vivant : celui des végétaux qui accumulent l'énergie, celui des animaux qui la dissipent. Si le premier l'emporte sur le second, il y a formation de stocks : ces conditions ont prévalu dans les ères géologiques où s'est accumulée la houille. Si, au contraire, la vie animale l'emporte, il y a déstockage et la vie animale est ramenée à un niveau compatible avec la production végétale. Ainsi s'établit un certain équilibre entre production et accumulation d'énergie. Le travail utile de l'homme ou des animaux domestiques peut déplacer cet équilibre, en particulier en augmentant l'énergie solaire accumulée par les plantes, en retardant la dissipation. En s'efforçant de nouer le fil du produit net des physiocrates à celui de la valeur-travail, de combiner à cette dernière une théorie de la valeur-énergie, Podolinsky apporte une contribution majeure à ce qui sera bientôt défini comme l'économie écologique.*

(...)

*Patrick Geddes, quant à lui, (...) mena de front des travaux dans ce domaine (la biologie) et, assez vite, une réflexion d'écologie humaine très originale. Mais il est plus connu pour ses idées novatrices en planification urbaine. (...) il construit des tableaux de type entrées-sorties, en termes physiques, inspirés du Tableau économique des physiocrates. La première colonne du tableau recense les entrées physiques sous forme d'énergie et de matière d'origine minérale, végétale ou animale. Ces flux entrants sont ensuite transformés en trois étapes : extraction, manufacture, puis transport et échange. Dans les sociétés de taille importante, une partie considérable des produits intermédiaires est consommée dans le procès de production et de transport lui-même; cette consommation correspond à une perte, à chaque étape, et doit donc être soustraite du produit final. Geddes compare les sorties, le produit net des physiocrates, aux entrées, et met ainsi en évidence le formidable gaspillage de ressources dont sont responsables les processus de production et de distribution industriels. A partir de cette analyse en termes physiques, Geddes propose une sociologie classant les individus dans la société suivant leur position dans son schéma de production. Son tableau se présente finalement comme une vaste matrice de la société, incluant physique, géologie, botanique et zoologie économiques et s'inscrivant dans une économie généralisée de la nature. Patrick Geddes est le premier, parmi les critiques de l'orthodoxie économique, à introduire l'énergie - dont il montre que la consommation augmente exponentiellement - comme une dimension essentielle du processus économique; le premier aussi à proposer des comparaisons entre niveaux de consommation per capita par pays. Même si sa démarche reste limitée (...) elle porte une critique fondamentale aux écoles de pensée économiques dominantes, qui prétendent se passer de l'apport des sciences de la nature et bâtir des théories « comme si la théorie de l'évolution ou les lois de conservation et de transformation de l'énergie n'existaient pas ~ Et puisque les économistes ne sont pas à la hauteur de leur tâche, estime Geddes, les chercheurs des autres disciplines scientifiques doivent envahir leur domaine, pour y procéder aux développements nécessaires.*

*Mais les pistes théoriques ouvertes par Podolinsky et Geddes ont été perdues pendant près d'un siècle pour n'être redécouvertes qu'à la fin du nôtre. Les préjugés anti-écologiques et antithermodynamiques des écoles de pensée dominantes en économie, partagés par Marx, Engels, et leurs héritiers de toutes obédiences, ont largement contribué à cet enfouissement sans sépulture, comme à celui des théories de l'économie destructive, la Raubwirtschaft proposée par le géographe allemand Ratzel dès 1882.*

### A.2.3.3 essais modernes d'écologie économique

#### *première formulation générale (Eugène R. Odum)*

Connu surtout pour son traité "Fundamentals of Ecology", publié à Philadelphie, en 1953, E.R.Odum ne s'est pas arrêté à la distinction en systèmes humains et naturel.

Jacques Vigneron, dans le cadre de la présentation d'un ouvrage d'écologie industrielle <sup>1</sup>, résume comme suit cet aspect de sa problématique :

p.4

*Ce qui caractérise la typologie des écosystèmes, c'est l'alternative entre l'énergie solaire et l'énergie d'origine humaine. Les principaux types d'écosystèmes, selon Eugène R. Odum, peuvent être classés en fonction de leur source et de leur niveau d'énergie : —les écosystèmes naturels non « subventionnés », alimentés par l'énergie solaire, comme le sont la pleine mer, les grandes forêts qui jouent un rôle déterminant sur la stabilité de l'environnement terrestre (des modifications climatiques peuvent toutefois être associées à leur transformation ou à leur disparition); - les écosystèmes alimentés par l'énergie solaire, et "subventionnés" par d'autres écosystèmes, par exemple les estuaires; — les écosystèmes alimentés par l'énergie solaire, mais "subventionnés" par l'homme, comme les agro-écosystèmes, les "aqua-écosystèmes", les champs d'aqua-culture; - les systèmes urbano-industriels alimentés par des combustibles; Eugène P. Odum désigne alors les villes, les banlieues et les parcs industriels. En fait, l'écologie a d'abord étudié des cas précis comme les lacs, les étangs, certains estuaires ou rivages marins, les rivières et les fleuves, les marais d'eau douce, les toundras, les prairies et les forêts. Progressivement, ont émergé de ces différentes monographies des lois de fonctionnement des écosystèmes, constituant le corpus spécifique des connaissances écologiques. Néanmoins, une sorte de continuum apparaît entre écosystèmes naturels et artificiels, et cela d'autant plus qu'ils agissent les uns sur les autres. L'écologie classique classe l'ensemble des écosystèmes qui constituent l'environnement terrestre à partir des réseaux d'intégration successifs de la cellule aux populations. On peut alors distinguer deux types d'écosystèmes : les écosystèmes « naturels » ou biologiques, où la densité humaine est faible, et les écosystèmes humains, définis par un certain nombre de paramètres supplémentaires.* <sup>2</sup>

La classification en "naturel" et humain", qui subsiste, n'est plus ici que l'application d'un critère de densité dans un continuum. Mais E.R.Odum prend en compte d'autres dimensions de l'activité humaine, comme le précise Vigneron :

p.4

#### *APPROCHE PLURIDIMENSIONNELLE : Milieux, cycles et acteurs*

*Milieux : L'approche par milieux concerne les questions de l'eau, de l'air, du sol et du milieu marin; Cycles : L'approche par cycles concerne le cycle de l'eau, le cycle du carbone, le cycle des métaux lourds, etc.; Acteurs : L'approche par acteurs concerne les végétaux et les animaux, des insectes aux espèces plus sophistiquées de niveaux d'intégration élevés, c'est-à-dire les hommes. Dans les chaînes "production-consommation-distribution-recyclage", les hommes possèdent en tant qu'acteurs plusieurs fonctions suivant le rôle qu'ils occupent dans la*

---

<sup>1</sup> "ECOLOGIE INDUSTRIELLE ", Philippe ESQUISAUD, EDF, HERMANN, PARIS, FRANCE, 1990.- fiche n°435

<sup>2</sup>

société. Le problème des acteurs est compliqué par l'organisation sociale que gèrent les derniers niveaux d'intégration des écosystèmes humains...

Cette formulation, pour intéressante qu'elle soit, est suivie dans l'ouvrage cité d'applications d'écologie industrielle (par Philippe Esquissaud) qui nous ramènent dans le champ plus restreint de l'intégration à l'économie de certaines contraintes environnementales. Il est évident que tant que l'écologie globale ne fournit pas de cadre de référence aux applications concrètes, celles-ci restent dominées par la logique économique ordinaire, dont la tolérance à l'introduction de facteurs exogènes est relativement limitée.

### ***Le courant éco-énergétique et la bio-économique***

L'analyse énergétique connaît un grand développement chez les écologues à partir des années 1950. Le courant dont nous allons parler a cherché à y intégrer systématiquement les activités humaines, et c'est à ce titre qu'il nous intéresse particulièrement ici. Pour décrire l'essor de ce courant, rendons pour commencer la parole à J.P.Déléage (op.cit).

*p.136 à 138 (extraits) <sup>1</sup>*

*Dans la cohorte de ceux qui se sont consacrés à l'analyse énergétique, Howard Tresor Odum<sup>2</sup> en a proposé la formalisation la plus systématique. (...) Ses premiers travaux (...) se situent dans une perspective systémique inspirée par G.-E. Hutchinson et Alfred J. Lotka. (...). Dans un travail postérieur (...) Odum trace ses premiers diagrammes énergétiques, diagrammes dans lesquels on trouve une analogie profonde avec des schémas de circuits électriques. Ces schémas permettent de traduire un principe unique régissant la structure et la dynamique des écosystèmes. Ce principe s'ajoute aux principes classiques de la thermodynamique. Ces derniers, au nombre de quatre, permettent de définir l'équilibre thermique, la conservation de l'énergie, l'irréversibilité de ses transformations mesurée par l'entropie, les propriétés de la matière au voisinage du zéro absolu. La plupart des systèmes étudiés par la thermodynamique classique sont des systèmes à l'équilibre, ce qui n'est pas le cas des systèmes vivants, donc des*

---

<sup>1</sup> références citées par Deléage dans ce texte

ODUM Eugene, *Fondamentals of Ecology*, Philadelphie, W.-B. Saunders Company, 1953.

ODUM Howard T., • *The Biogeochemistry of Strontium ~*, Ph. D. diss, Yale University, 1950.

LOTKA Alfred, *Elements of Physical Biology*, 1925; rééd. sous le titre *Elements of Physical Biology*, New York, Dover, 1956

ODUM H.-T., « *The Stability of the World Strontium Cycle* », *Science*, 114, 1951

ODUM H.-T., • *Trophic Structure and Productivity of Silver Springs, Florida ~*, *Ecological Monograph*, vol. 27, n° 1, 1957

VIEIRA D SILVA J., *Introduction à la théorie écologique*, Paris, Masson, 1979

ODUM H.-T., . *Biological Circuits and the Marine Systems of Texas* in OLSON T.-A. et BURGESS F.-J. (eds.), 1967, *Pollution and Marine Ecology*, New York, Interscience, 1967

TAYLOR Peter J., *Technocratic Optimism, H.-T. Odum and the Partial Transformation of Ecological Metaphor after World War II*, *Journal of the History of Biology*, v. 21, 2, 1988.

ODUM H.-T., • *Environment, power and society*, New York, Wiley-Interscience, 1971

<sup>2</sup> H.T.Odum , frère cadet de E.P.Odum cité précédemment, est à l'origine spécialiste de chimie nucléaire

écosystèmes. Odum propose un principe supplémentaire, le « principe du maximum de puissance ~ qu'il attribue à Alfred J. Lotka. Selon ce principe, les écosystèmes, qui ont des aptitudes particulières à l'utilisation de la puissance des flux d'énergie, sont aussi les plus aptes à la survie et à la domination. Ainsi serait expliquée l'augmentation du nombre d'espèces et de la diversité au cours de la succession écologique, tout au moins sur certaines échelles de temps. Odum attribue à ce principe de Lotka une validité universelle. Il explique, selon lui, la dynamique des systèmes écologiques, mais aussi celle des civilisations humaines. Odum utilise, à partir des années soixante, un langage symbolique qui permet de rendre compte de toutes les configurations énergétiques élémentaires intervenant dans un système complexe. Prélèvement, perte, amplification, recyclage, échange, feedback, couplage, etc., sont autant de processus qui interagissent à l'intérieur des réseaux trophiques<sup>1</sup> complexes de l'écosystème. Sur les diagrammes représentant les modèles opérationnels apparaissent toujours, d'une part, les processus naturels, respiration des animaux et des plantes, prélèvement des nutriments, sources d'énergie; d'autre part, les processus artificiels et sociaux tels que prélèvements, pollution, tourisme, transactions monétaires. Processus sans lesquels on ne saurait comprendre la dynamique évolutive des écosystèmes modifiés par les activités humaines. Selon Odum, en effet, il n'y a pas de différence essentielle entre faits naturels et faits sociaux. Dans les deux cas, le même principe d'optimisation de l'usage des matières premières et de l'énergie est à l'œuvre. Qu'on le veuille ou non, les humains sont intervenus sur des écosystèmes primitivement vierges et, écrit Odum, "les anciens systèmes et les nouveaux ont été réunis à l'intérieur d'un réseau global incluant usines et villes, récifs et étendues herbeuses, ainsi que tous les flux qui les relient". Le but assigné à la modélisation écologique consiste, au fond, à représenter le dessin (design) commun des systèmes de l'homme et de la nature. Cette démarche transcende évidemment les divisions traditionnelles entre les diverses sciences. Son but avoué n'est autre que de développer les bases théoriques de la science des interventions humaines sur la nature. C'est le programme du très ambitieux ouvrage "environment, power and society" publié en 1971...

Ces recherches s'appuient donc sur les principes de la thermodynamique formulés par Sadi Carnot, auxquels Lotka ajoute (d'après H.T.Odum) un principe supplémentaire dit du "maximum de puissance". Suivant ce principe, à mesure des transferts, l'énergie décroît (entropie) mais sa capacité à fournir un travail utile augmente.

Concrètement, l'éco-énergétique aboutit, d'après Sylvie Faucheux et Frank-Dominique Vivien<sup>2</sup>, à 4 types de calculs :

Le calcul enthalpique, qui est celui du pouvoir calorifique de l'énergie, est couramment pratiqué : il est à la base notamment des calculs en TEP (tonnes d'équivalent pétrole)

---

<sup>1</sup> une chaîne trophique est une "succession d'organismes puisant leur aliment séquentiellement à partir d'organismes en amont et constituant les aliments d'autres organismes en aval" (Bouché, op.cit. p.157). Des organismes fonctionnant en parallèle sont dits de même "niveau trophique". En fait, beaucoup d'organismes puisent leur alimentation à plusieurs niveaux, ce qui amène les écologues à décrire des "réseaux trophiques" complexes dont les niveaux trophiques ne sont qu'une image simplifiée.

<sup>2</sup> "PLAIDOYER POUR UNE ECOENERGETIQUE - inclus dans: LA RECHERCHE - N°243 (voir fiche n° 483)", Sylvie FAUCHEUX, Frank-Domi VIVIEN, PARIS, FRANCE, in "la Recherche", 5/92. fiche n°482

Le calcul exergétique mesure le pouvoir mécanique de l'énergie. (on l'appelle aussi calcul de l'énergie utile), d'après le rendement de Carnot, qui est le rendement maximum pour un processus de conversion donné.

Le calcul émergétique<sup>1</sup> permet de mesurer le contenu en énergie solaire d'une forme particulière d'énergie, la quantité d'énergie solaire qui a été nécessaire pour la produire. On y retrouve l'application du principe de Lotka : quand l'énergie décroît, son exergie croît, donc sa capacité à fournir un travail utile.

Le calcul entropique enfin apparaît dans les années 1980, en Allemagne (M.Faber, H.Niemes, R.Kummel) et au Japon (Y.Tamanoï, A.Tsushida et T.Murota). Il permet d'évaluer le bilan thermique planétaire, mais aussi à un tout autre niveau de fonder une échelle de pollution sur une échelle entropique.

Que tout ceci aboutisse à une connaissance quantitative de plus en plus complète du fonctionnement planétaire, intégrant cette fois les activités humaines, est certain. Que l'on puisse en tirer aussi des outils d'aide à la décision est probable. Ce peut être une des bases de la gestion écologique de la planète. Mais que l'on puisse en faire, comme l'espéraient certains des bâtisseurs de cet ensemble théorique, une comptabilité planétaire dans laquelle l'énergie remplacerait l'argent comme équivalent universel dans les échanges, est mis en doute par les écologues eux-mêmes. D'après J.P.Déléage, *"de nombreuses critiques, en premier lieu celle de Nicholas Georgescu-Roegen, ont montré la vanité d'une théorie énergétique universelle"*

Nous finirons donc sur la bio-économique développée par N. Georgescu-Roengen, économiste américain et sur laquelle nous avons malheureusement (au moment de boucler le présent rapport) peu de documentation. S.Faucheux et F.D.Vivien (op.cit.) résument comme suit son approche :

*Cette approche (...) vise en fait à l'abandon du paradigme newtonien, qui assimile les systèmes économiques à des systèmes mécaniques réversibles, et à lui substituer un paradigme thermodynamique et biologique évolutionniste. Il s'agit en effet, selon G.R., de considérer le processus économique comme le prolongement de l'évolution biologique. Ce travail fondamental de reformulation de l'analyse économique a rencontré peu d'échos jusqu'ici.*

---

<sup>1</sup> le terme "émergie" provient d'une contraction de "embodied energy", en substance "énergie contenue"

#### **A.2.3.4 conclusion écologique**

La théorie écologique, malgré des tentatives intéressantes mais relativement marginales, ne paraît pas plus prête à intégrer la dimension socio-économique que la théorie économique n'arrive à assimiler la dimension écologique. Toutefois les obstacles rencontrés paraissent plus dûs à une absence de moyens que, comme dans le cas précédent, à une réelle incompatibilité. Nous allons reprendre ci-après l'ensemble des questions posées dans les deux dimensions.

## A.3 - APPLICATIONS ET CONCLUSIONS

### A.3.1 - reformulation générale

#### A.3.1.1 *I' économie est elle anti-écologique ?*

L'approche que nous avons développée dans ce chapitre, et qui part de la généralité des processus vitaux planétaires pour en arriver pour l'instant à la particularité des mécanismes économiques, paraît bien confirmer l'hypothèse d'une réelle antinomie.

- les formations écologiques sont (à l'échelle historique) des systèmes matériellement très fermés et énergétiquement tout à fait ouverts (si l'on tient compte des échanges entre écosystèmes, toute la matière entrante se retrouve à la sortie, mais toute l'énergie est consommée. Cycle fermé de la matière, flux constant d'énergie).
- les formations économiques sont des systèmes matériellement et énergétiquement ouverts. Pour l'énergie, ce qui entre est encore fait pour être consommé, la différence n'est pas là : ce qui entre n'est plus le flux solaire permanent, mais le stock puisé dans la lithosphère. Pour la "production"<sup>1</sup>, ce qui sort n'est pas ce qui entre. Les bouclages (récupération et recyclage) ne sont plus la règle mais l'exception.

Pour boucler son cycle vital, l'entreprise "économiquement productive" est branchée sur un autre cycle, le cycle monétaire, qui permet de renouveler les entrées à partir de la valorisation des sorties. Les "producteurs secondaires" vivants de l'entreprise (ses travailleurs) ne sont pas branchés directement sur le circuit énergie-matière comme dans un processus écologique, mais en dérivation sur le circuit monétaire, qui est censé satisfaire leurs besoins vitaux. En outre le même cycle monétaire alimente directement les possesseurs de son capital. Ceux-ci le recyclent indéfiniment sans autre obligation que d'arriver au bout de chaque cycle avec un "rendement monétaire" positif. Il y a enfin sur le cycle monétaire la série de "prélèvements obligatoires" destinés à couvrir les fonctions générales d'organisation et de reproduction sociale, sans parler des pertes en charge et fuites diverses...

---

<sup>1</sup> qui peut s'analyser en termes écologiques comme une "production secondaire", ou une consommation

Et comme c'est ce cycle qui commande tous les autres, et que son fonctionnement continu et positif commande la survie économique de l'entreprise avec la même exigence que les cycles de respiration et d'alimentation commandent celle d'un organisme vivant, on comprend que sa logique s'impose.

A l'inverse d'un processus écologique, qui est généralement commandé par le facteur le plus limité (notion de facteur limitant), le processus de production humain est commandé par le facteur le plus illimité que l'on puisse imaginer, la monnaie. Il y a de ce point de vue des rythmes à ne pas forcer, des équilibres entre blocs économiques à respecter, mais rien n'empêche les masses monétaires d'évoluer à leur manière, parfois erratique, mais qui surtout n'a rien à voir avec les exigences des équilibres naturels de la planète.

#### ***A.3.1.2 réintégrer l'humanité dans l'étude de l'écosphère***

Pour compléter notre approche, il conviendrait donc de développer une vision écologique des activités humaines, habituellement laissées hors champ par la plupart des écologues. Le premier point de vue adopté est que toute activité engendrant des mouvements physiques de matière ou transformations d'énergie est traitable dans les termes de l'écologie globale. Ajoutons à ceci les termes spécifiques aux activités humaines, les populations, leur occupation de l'espace et leurs déplacements, et le tableau sera à peu près complet. Les transports maritimes constituent évidemment, dans cet ensemble, un sous-système pertinent.

Nous ne prétendons pas bâtir à nous seuls cette approche, dans le cadre du présent travail. L'hypothèse que nous émettons est qu'il faudra bien, dans un avenir relativement proche, que les sciences de l'homme apprennent à poser dans ces termes les problèmes humains qui sont en relation avec les grands équilibres planétaires. Et que, corrélativement, les écologues se donnent les moyens de les intégrer dans leur systémique planétaire. Les matériaux et méthodologies utilisables pour notre objet devraient donc se développer dans les temps qui viennent.

En première lieu, on verra probablement le clivage ancien entre "naturel" et "artificiel" faire place à l'étude de tous ces systèmes dans les termes généraux des écosystèmes, complétés par l'introduction des différenciations en fonction des degrés et modalités d'intervention de l'espèce humaine en leur sein.

Aux types d'écosystèmes retenus par les écologues, et qui sont d'ailleurs marqués dans la réalité par toute la gamme des interventions humaines,

il convient donc d'ajouter des systèmes humains localisés, ou fonctionnels : les villes, les réseaux de transports, les industries, et les systèmes agricoles dont la prise en compte par les écologues n'est que partielle. Plus qu'une typologie plus ou moins intuitive, nous devons chercher les bases d'une formulation générale.

Les écosystèmes, quelles que soient les formes et intensités de leurs composantes humaines, pourraient être étudiés d'abord selon les termes généraux que nous avons sommairement exposés sous le titre 2.1 ci-dessus. D'abord par leurs compartiments, constituants et états, en interrelation et en relation avec les termes correspondants de l'écosphère. Ensuite dans les dynamiques d'économie de l'énergie, de la matière et de la vie, en interrelations et en relation avec les rythmes généraux de l'écosphère.

On introduirait enfin les mécanismes spécifiques aux sociétés humaines, ceux qui n'ont pas d'équivalents "naturels" ou plus précisément qui ont dans leur nature d'avoir été totalement inventés ou modifiés par l'humanité : économie monétaire, propriété foncière, institutions et pouvoirs politiques, guerres, échanges immatériels et gaspillages matériel, etc.... et pour finir transports maritimes.

L'espèce de précédence donnée ci-dessus, plus qu'une hiérarchie formelle et discutable entre ces divers niveaux d'analyse, indique la nécessité d'inverser la logique de l'approche économique habituelle pour arriver à une démarche réellement prospective.



## **ANNEXE B - LE MODÈLE POLESTAR**

*Le modèle POLESTAR (doc1067) a été évoqué dans le volume n°1 chapitre 3, titre 3.1.1. Cette annexe en donne une très brève description*



## LE MODELE POLESTAR

Stockholm Environment Institute

Tellus Institute (Boston)

Le Stockholm Environment Institute regroupe des équipes localisées en Suède, Royaume Uni, USA. L'équipe de Boston que nous avons rencontrée s'occupe plus particulièrement du montage du modèle Polestar.

Le besoin ressenti pour un outil d'évaluation global des politiques alternatives élaborées par les différentes équipes du réseau constitue le point de départ du modèle Polestar.

Son but est de fournir un outil d'évaluation des politiques s'appliquant dans un cadre géographique donné (une zone, un pays, une région,...). Les scénarios résultant de ces politiques sont évalués sur le plan de leur compatibilité avec la notion de développement soutenable.

La flexibilité est une des caractéristiques du modèle : il doit pouvoir s'adapter à différentes échelles temporelles ou géographiques et utiliser des données provenant de l'utilisateur.

Les variables utilisées sont de différents niveaux (Cf. figure 1) :

- des macro-variables : démographie, structure économique, niveau de revenu et niveau de vie,...
- des variables descriptives des activités humaines : habitat, transport (terrestres), industries, agriculture, énergie, mines, ... Chacune de ces variables est décomposée en sous-secteurs, eux-mêmes décrits sur le plan des process qu'ils mettent en oeuvre. (Cf. figure 2).
- des variables décrivant l'état des ressources (aux différentes étapes temporelles) : énergie, eau, terres, minéraux.
- des variables décrivant les effets des scénarios développés sur l'environnement : pollution atmosphérique, pollution des eaux, impact sur les terres, déchets.

Après avoir établi les variables de base, descriptives de la situation actuelle au niveau géographique choisi, l'utilisateur formule ses hypothèses à moyen terme : population, conditions économiques, modes de vie, technologie,... Polestar simule les flux de matière et les flux économiques (niveaux de pollution, déchets, etc.) et sur les ressources (prélèvement de matières premières, eau, etc.). Chacun des process, combiné avec les hypothèses de base (démographie, niveau de vie,...) se traduit par un niveau de prélèvement sur les ressources, et des externalités environnementales qui sont calculées par le modèle. Chaque scénario est évalué au regard de critères mesurant sa compatibilité avec le concept de développement durable. Les hypothèses peuvent être modifiées selon un processus itératif.

Polestar fonctionne donc en s'appuyant, en amont et en aval sur une représentation des états successifs ("accounts") que prennent différentes variables décrivant une situation de départ, puis la (ou les) situation(s) finale(s). Les hypothèses de base retenues se combinent à travers la chaîne de traitement (fondée sur des coefficients techniques), pour déboucher sur une situation finale. La structure descriptive est évidemment la même au départ et à l'arrivée. Elle est modulable selon le niveau géographique souhaité et les données disponibles par l'utilisateur (Cf. figure 1).

Les résultats de Polestar sont exprimés en terme de progressions démographique et économique, de déchets, de pressions sur l'environnement et de prélèvement sur les ressources. La partie évaluation du programme (Cf. bas de figure 1) compare les résultats obtenus avec une batterie d'indicateurs "de soutenabilité" (*indicators of sustainability*. Cf. exemple figure 3)

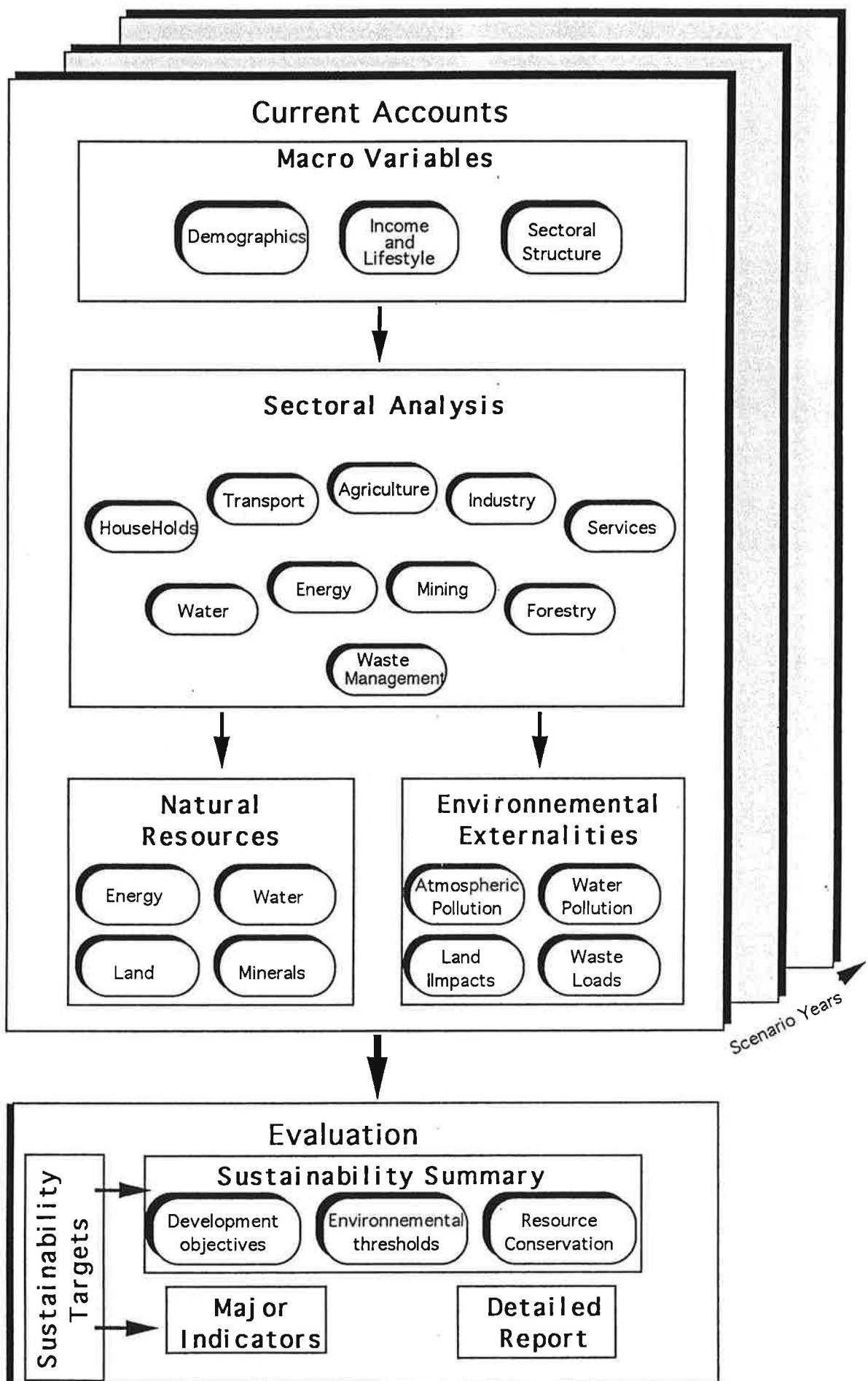


Figure 5. Partial Food and Agriculture Chain

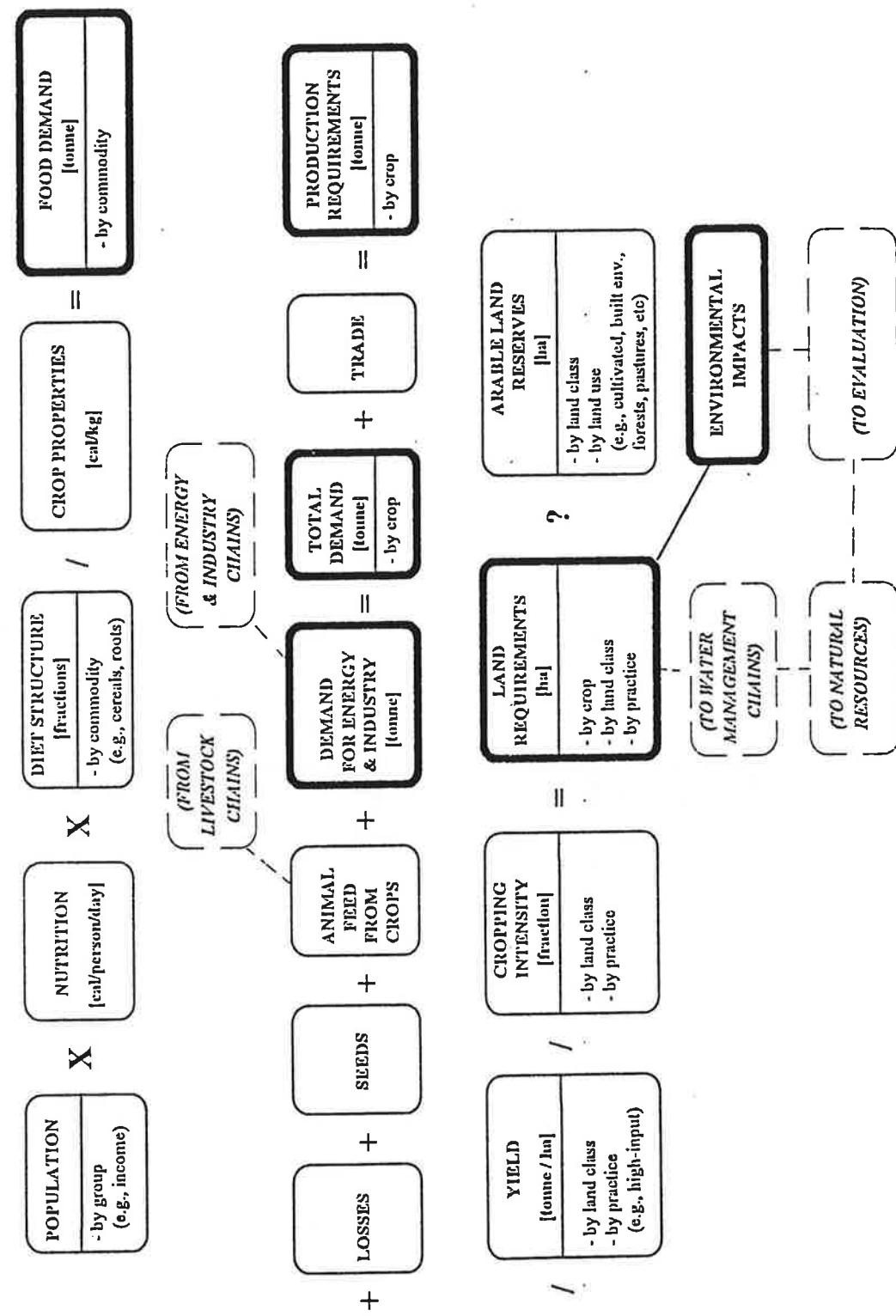
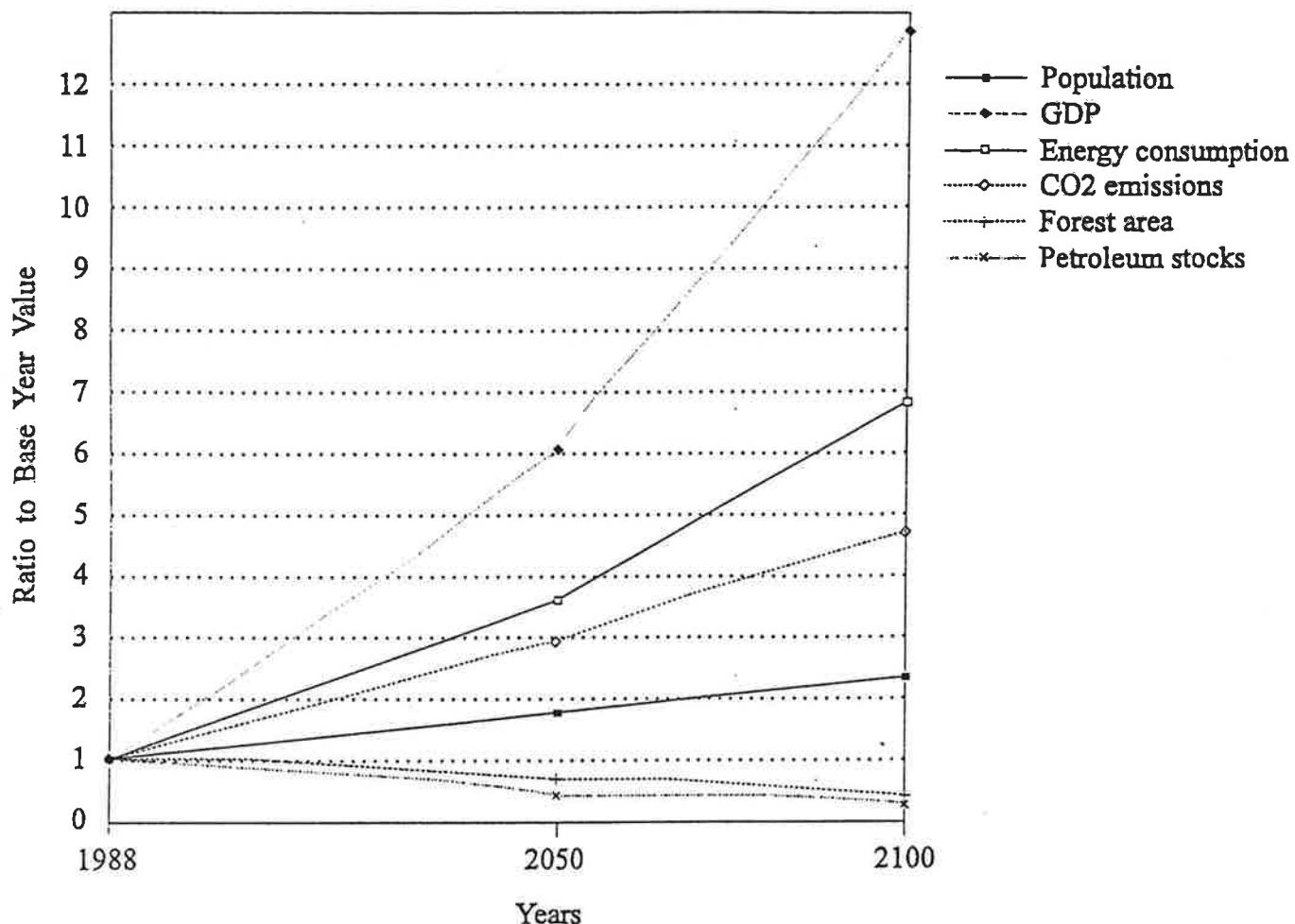


Figure 2

Figure 3

**Figure 6. Selected Major Indicators**

Scenario: TEST  
Region: SOUTH PROVINCE





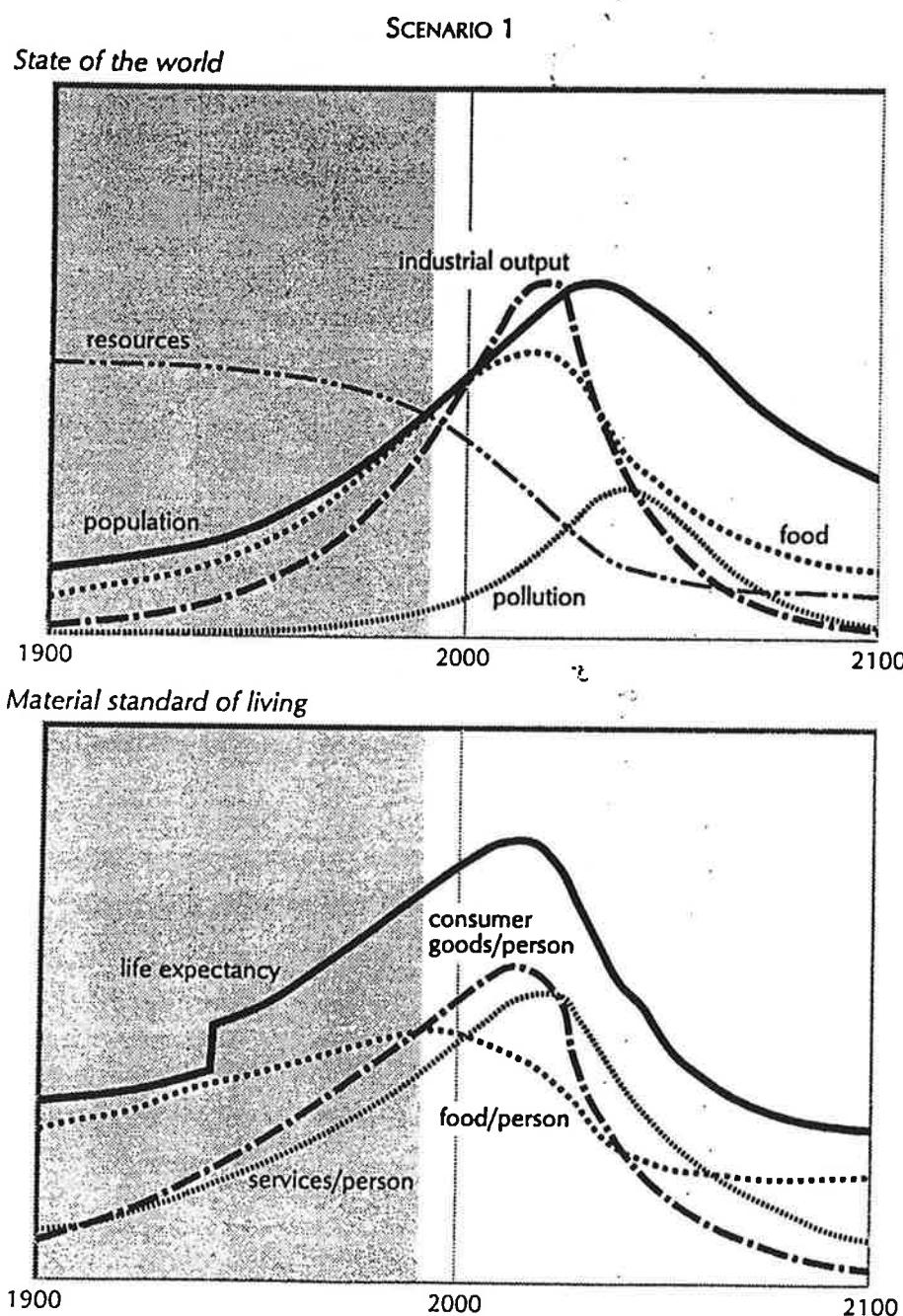
## **ANNEXE C - SCÉNARIOS "BEYOND THE LIMITS"**

*Les 13 scénarios du modèle "World3" (doc1266) présentés dans cette annexe ont été évoqués dans le volume n°1 chapitre 3, titre 3.1.1. , et dans le volume n°2 chapitre 1, titre 1.4.1*



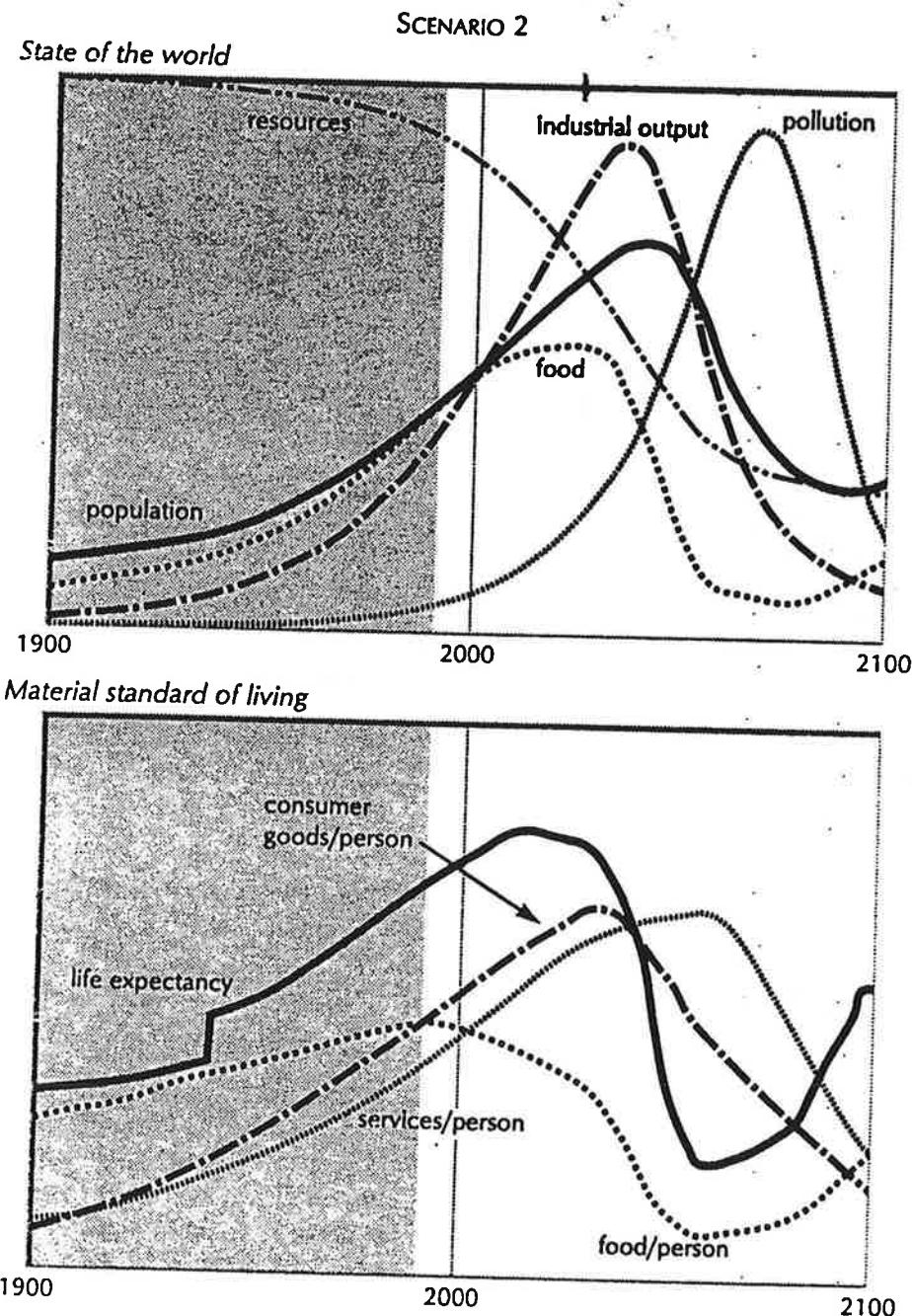
## Scenario 1 THE STANDARD RUN FROM THE LIMITS TO GROWTH

The world society proceeds along its historical path as long as possible without major policy change. Population and industry output grow until a combination of environmental and natural resource constraints eliminate the capacity of the capital sector to sustain investment. Industrial capital begins to depreciate faster than the new investment can rebuild it. As it falls, food and health services also fall, decreasing life expectancy and raising the death rate.



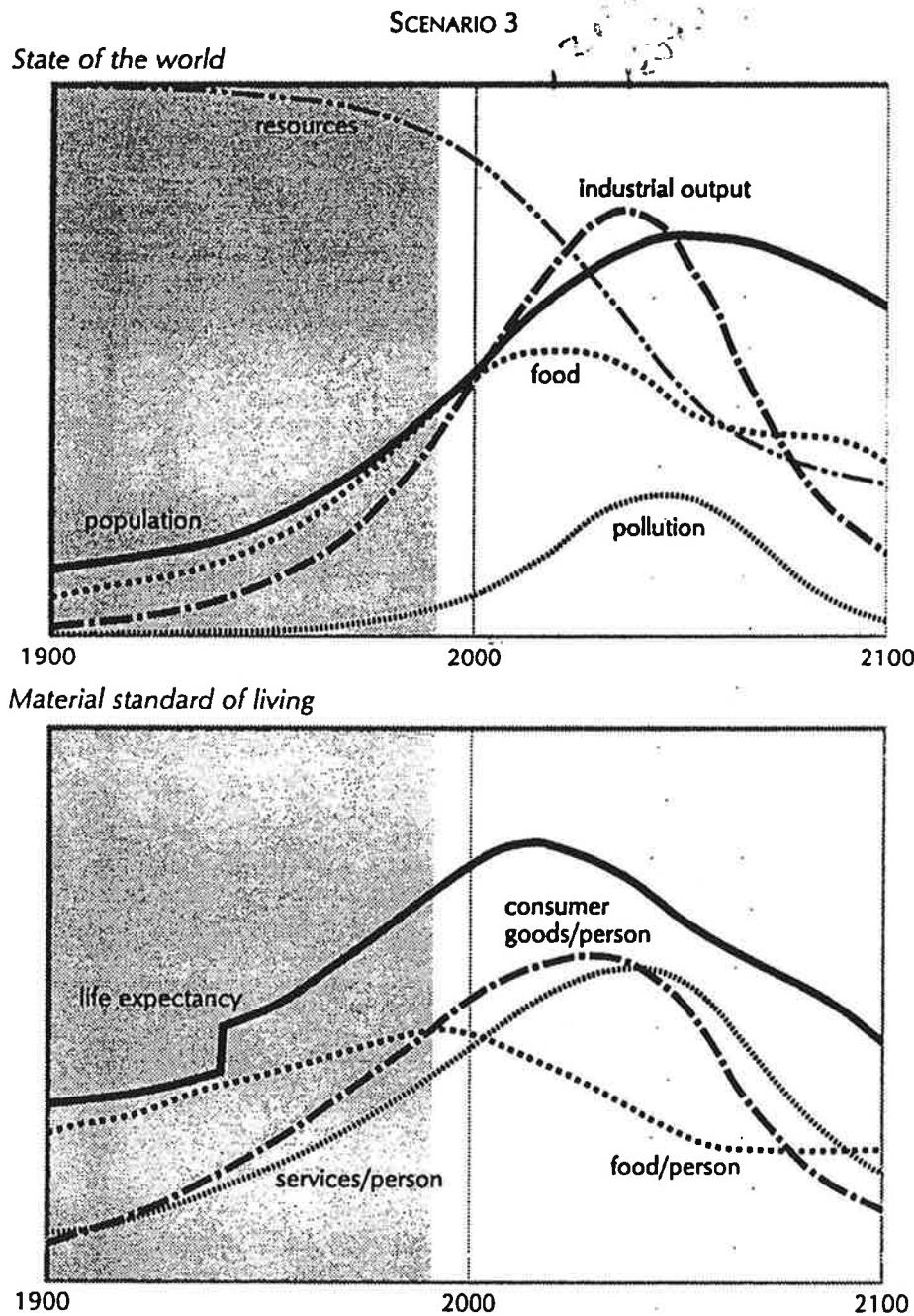
## Scenario 2 DOUBLED RESOURCES ARE ADDED TO SCENARIO 1

If we double the natural resource endowment we assumed in Scenario 1, industry can grow 20 years longer. Population rises to more than 9 billion in 2040. These increased levels generate much more pollution, which reduces land yield and forces much greater investment in agriculture. Eventually declining food raises the population death rate.



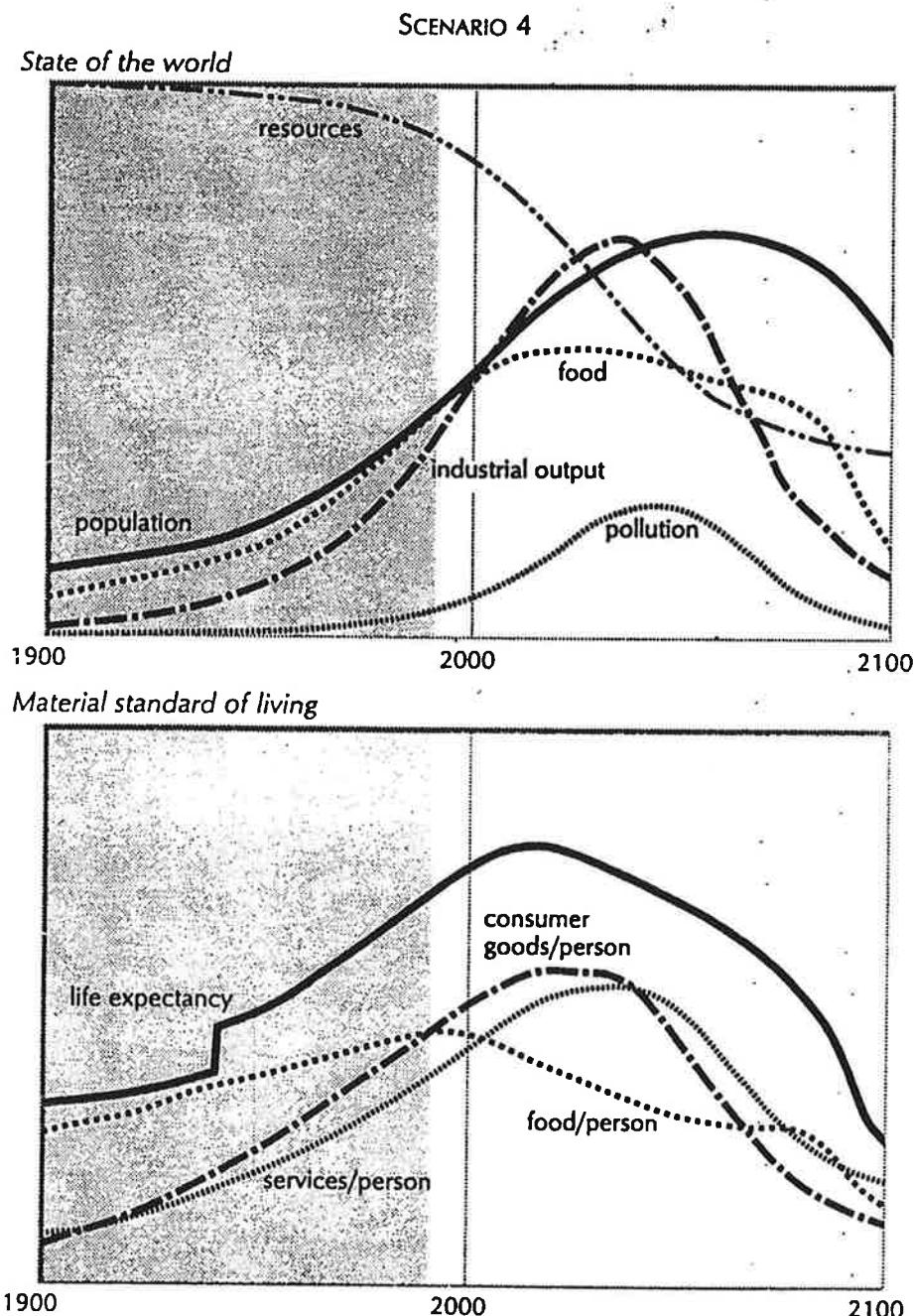
### Scenario 3 DOUBLE RESOURCES AND POLLUTION CONTROL TECHNOLOGY

In this scenario we assume doubled resources, as in Scenario 2, and also increasingly effective pollution control technology, which can reduce the amount of pollution generated per unit of industrial output by 3% per year. Pollution nevertheless rises high enough to produce a crisis in agriculture that draws capital from the economy into the agriculture sector and eventually stops industrial growth.



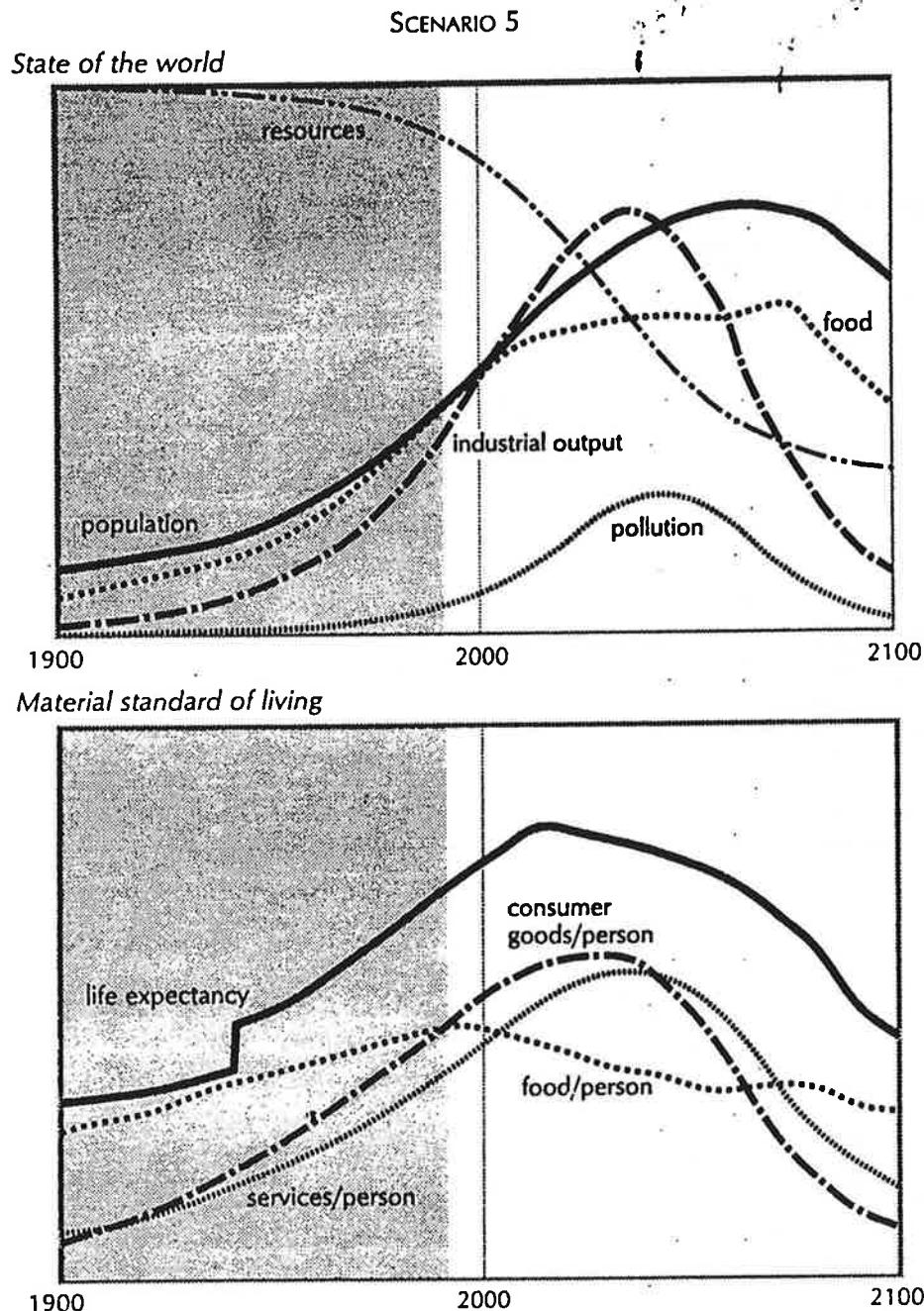
## Scenario 4 DOUBLE RESOURCES, POLLUTION CONTROL TECHNOLOGY, AND LAND YIELD ENHANCEMENT

If the model world adds to its pollution control technology a set of technologies to increase greatly the yield per unit of land, the high agricultural intensity speeds up land loss. The world's farmers are getting higher and higher yields on less and less land, and at an ever-higher cost to the capital sector.



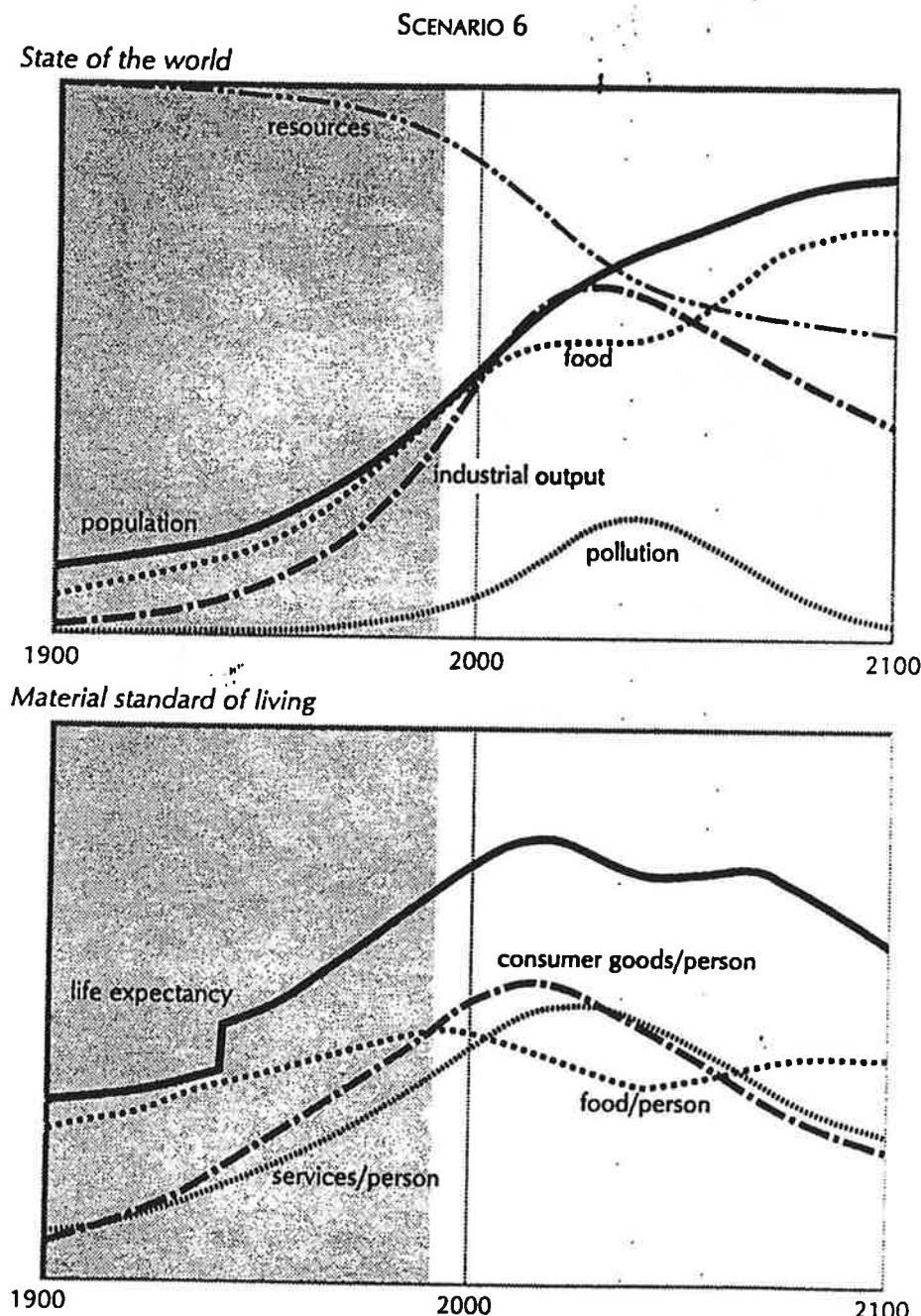
## Scenario 5 DOUBLE RESOURCES, POLLUTION CONTROL TECHNOLOGY, LAND YIELD ENHANCEMENT, AND LAND EROSION PROTECTION

Now a technology of land preservation is added to the agricultural yield-enhancing and pollution-reducing measures already tested. The result is further population and capital growth, which leads to a crisis not in resources, pollution, or land, but in all three at once.



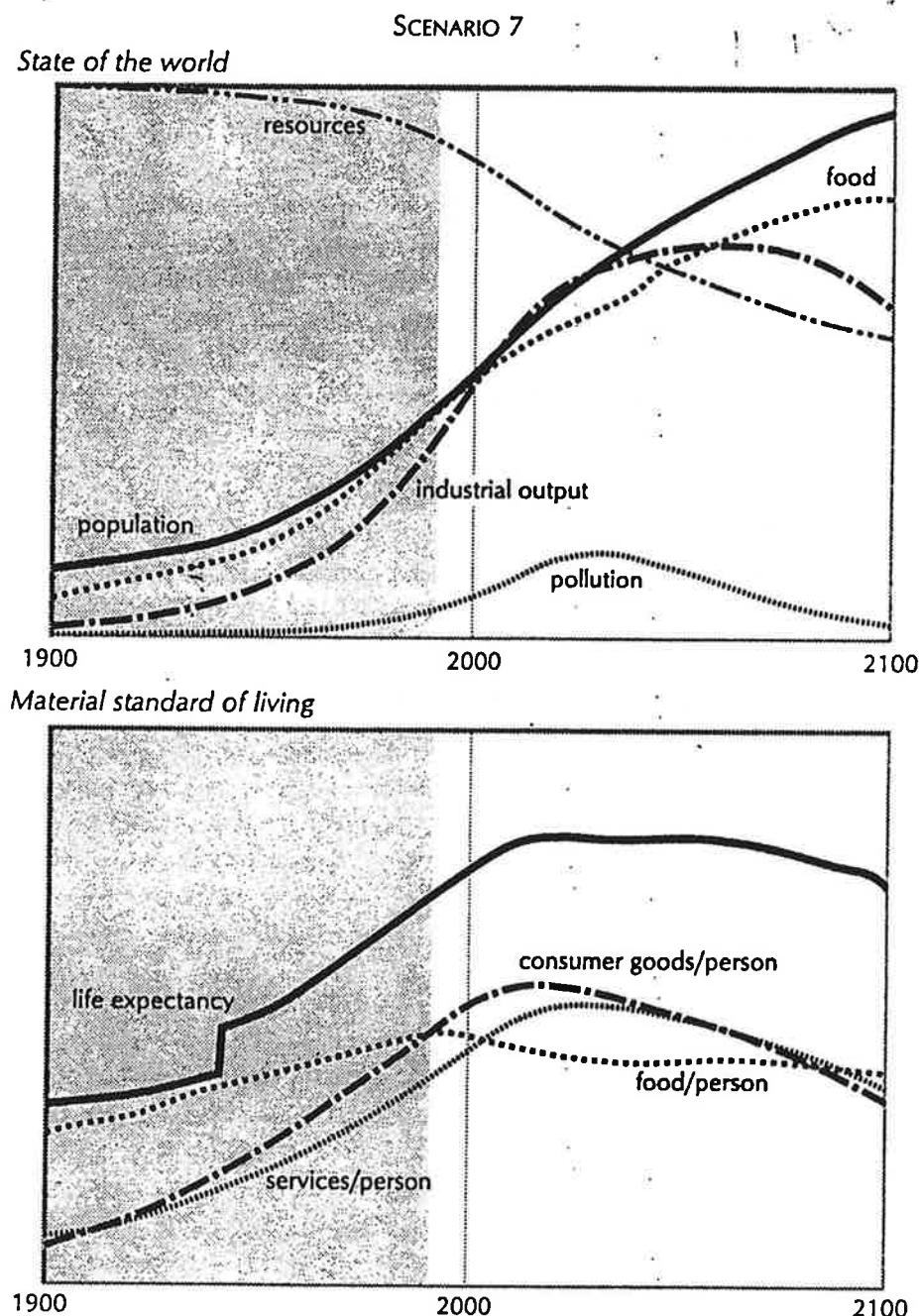
## Scenario 6 : DOUBLE RESOURCES, POLLUTION CONTROL TECHNOLOGY, LAND YIELD ENHANCEMENT, LAND EROSION PROTECTION, AND RESOURCE EFFICIENCY TECHNOLOGY

Now the simulated world is developing powerful technologies for pollution abatement, land yield enhancement, land protection, and conservation of nonrenewable resources all at once. All these technologies are assumed to cost capital and to take 20 years to be fully implemented. In combination they permit the simulated world to go on growing until 2050. What finally stops growth is the accumulated cost of the technologies.



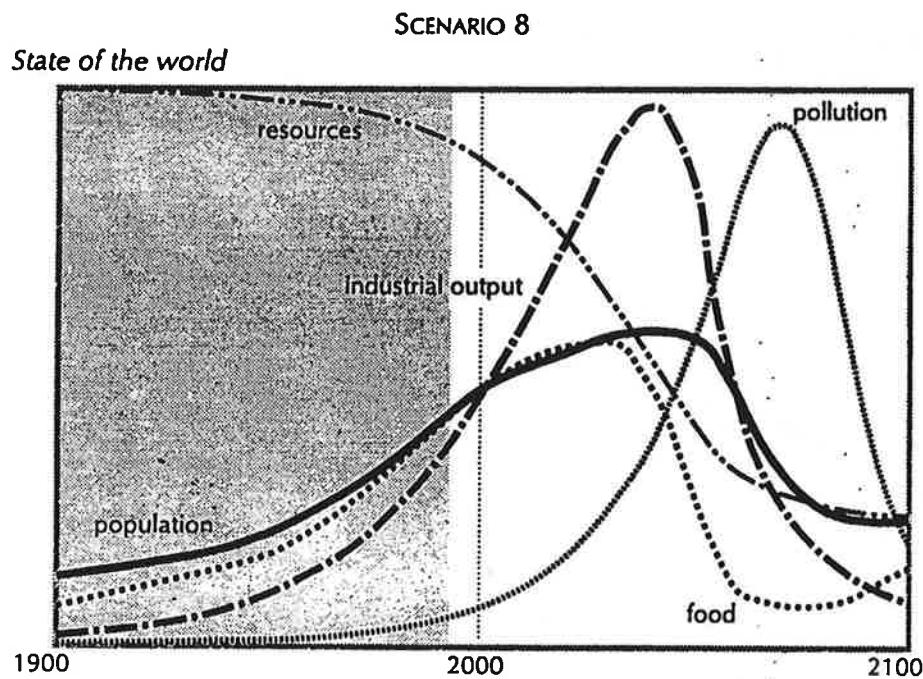
## Scenario 7 ALL TECHNOLOGIES APPLIED WITH SHORTER DELAYS

This model run is identical to the previous one, except that technology development is assumed to take only 5 years instead of 20 to have worldwide effect. Industrial output grows 20 years longer than it did in Scenario 6 and population becomes higher by 2 billion. But the material standard of living is falling slowly. The increasing cost of holding off the limits finally stops industrial growth.

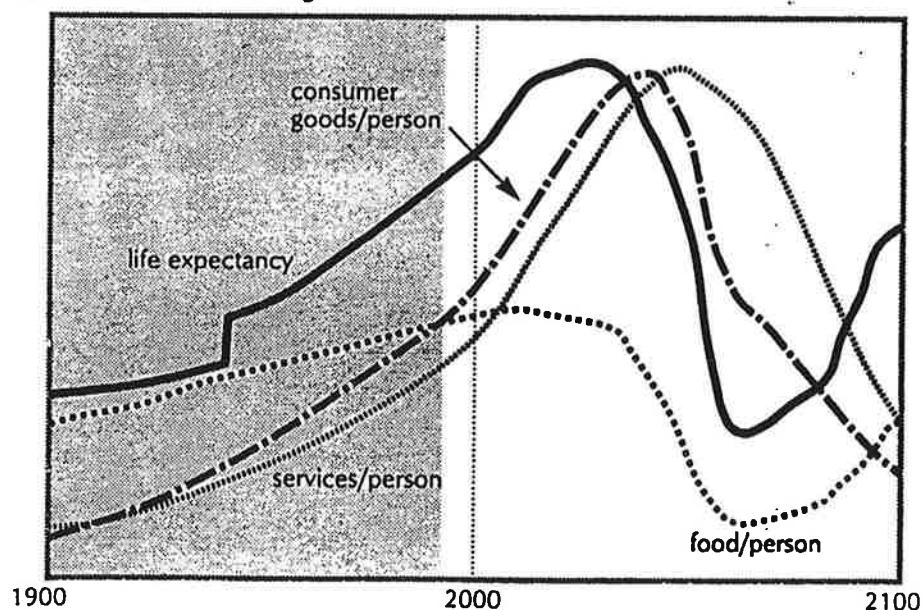


## Scenario 8 WORLD ADOPTS STABLE POPULATION GOALS IN 1995

This scenario supposes that after 1995 all couples decide to limit their family size to two children and have access to effective birth control technologies. Because of age structure momentum, the population continues growing well into the 21st century. The slower population growth permits industrial output to rise faster, until it is stopped by depleting resources and rising pollution.



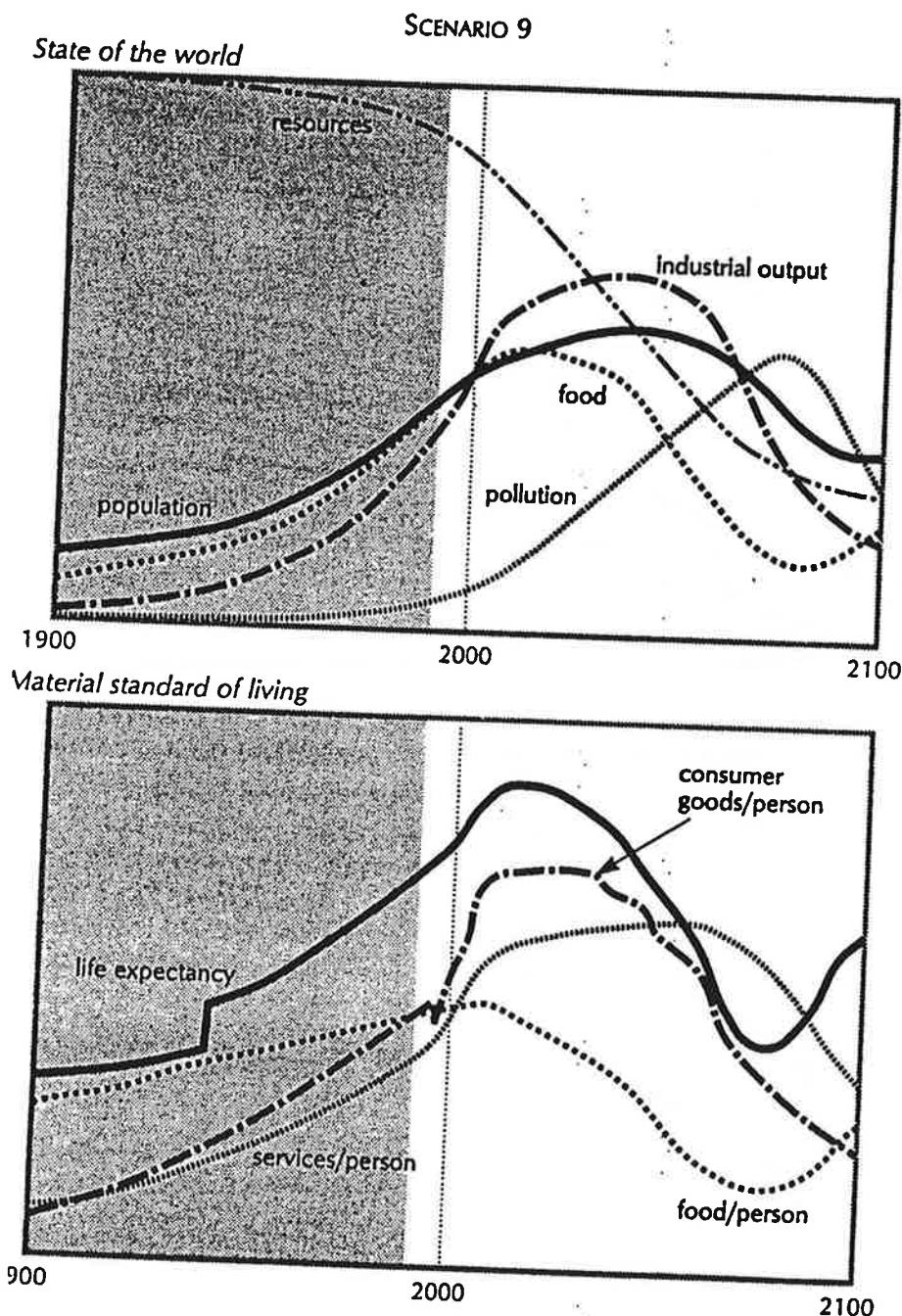
*Material standard of living*



## 63

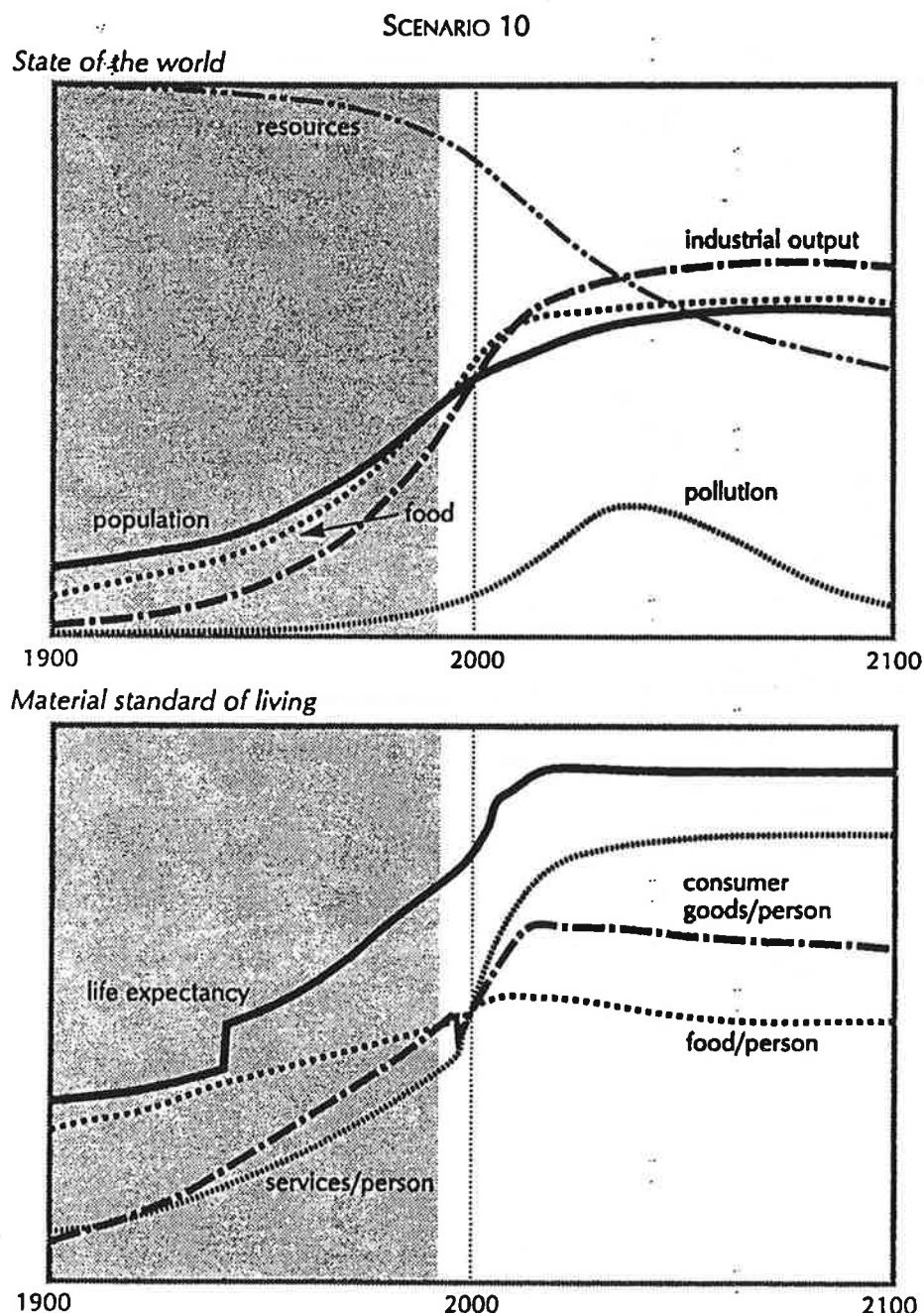
### Scenario 9 WORLD ADOPTS STABLE POPULATION AND INDUSTRIAL OUTPUT GOALS IN 1995

If the population adopts both a desired family size of two children and a deliberately moderated goal for industrial output per capita, it can maintain itself at a material standard of living 50% higher than the 1990 world average for almost 50 years. Pollution continues to rise, however, stressing agricultural land. Per capita food production declines, eventually carrying down life expectancy and population.



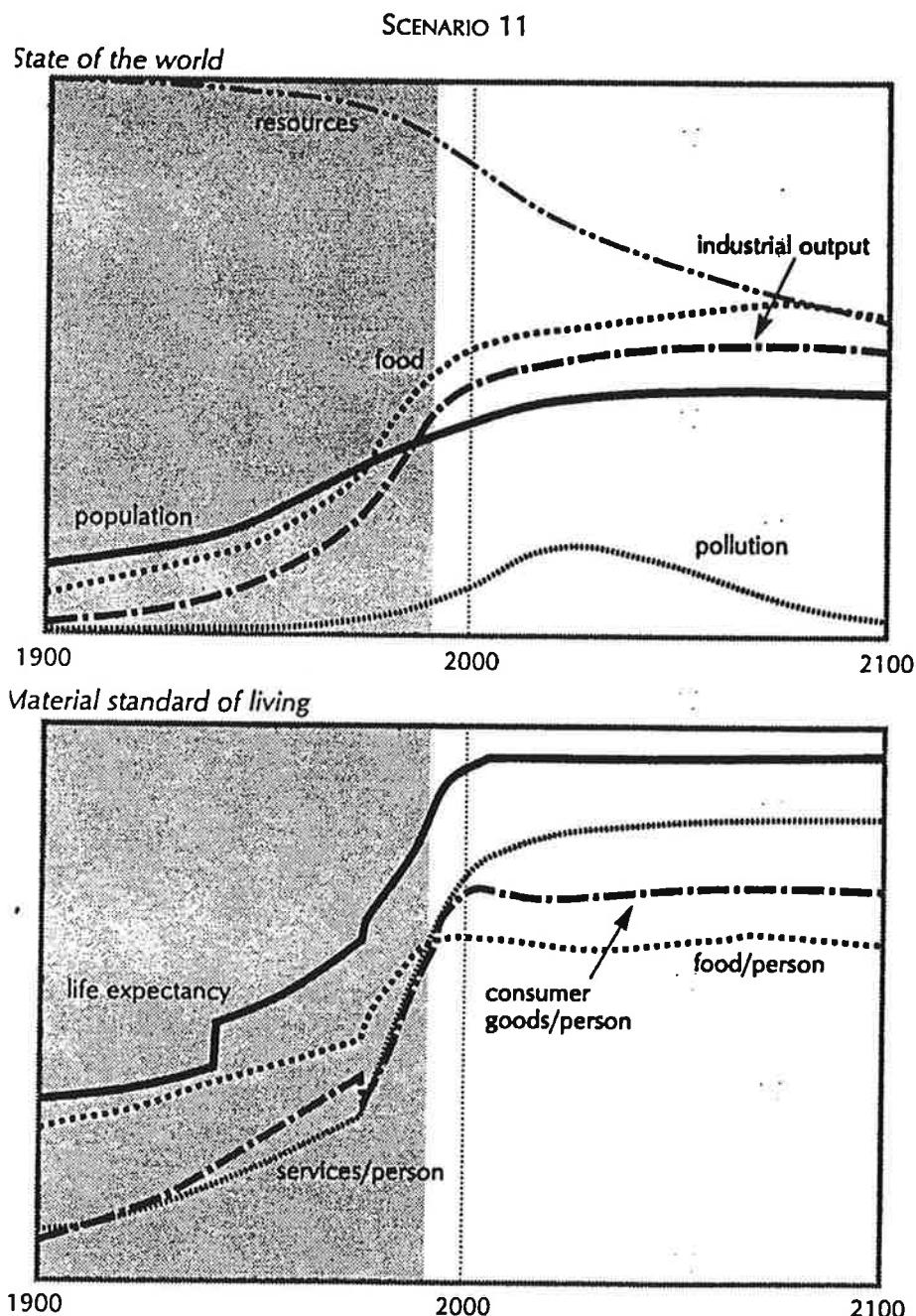
## Scenario 10 STABILIZED POPULATION AND INDUSTRY WITH TECHNOLOGIES TO REDUCE EMISSIONS, EROSION, AND RESOURCE USE ADOPTED IN 1995

In this scenario population and industrial output per person are moderated as in the previous model run, and in addition technologies are developed to conserve resources, protect agricultural land, increase land yield, and abate pollution. The resulting society sustains 7.7 billion people at a comfortable standard of living with high life expectancy and declining pollution until at least the year 2100.



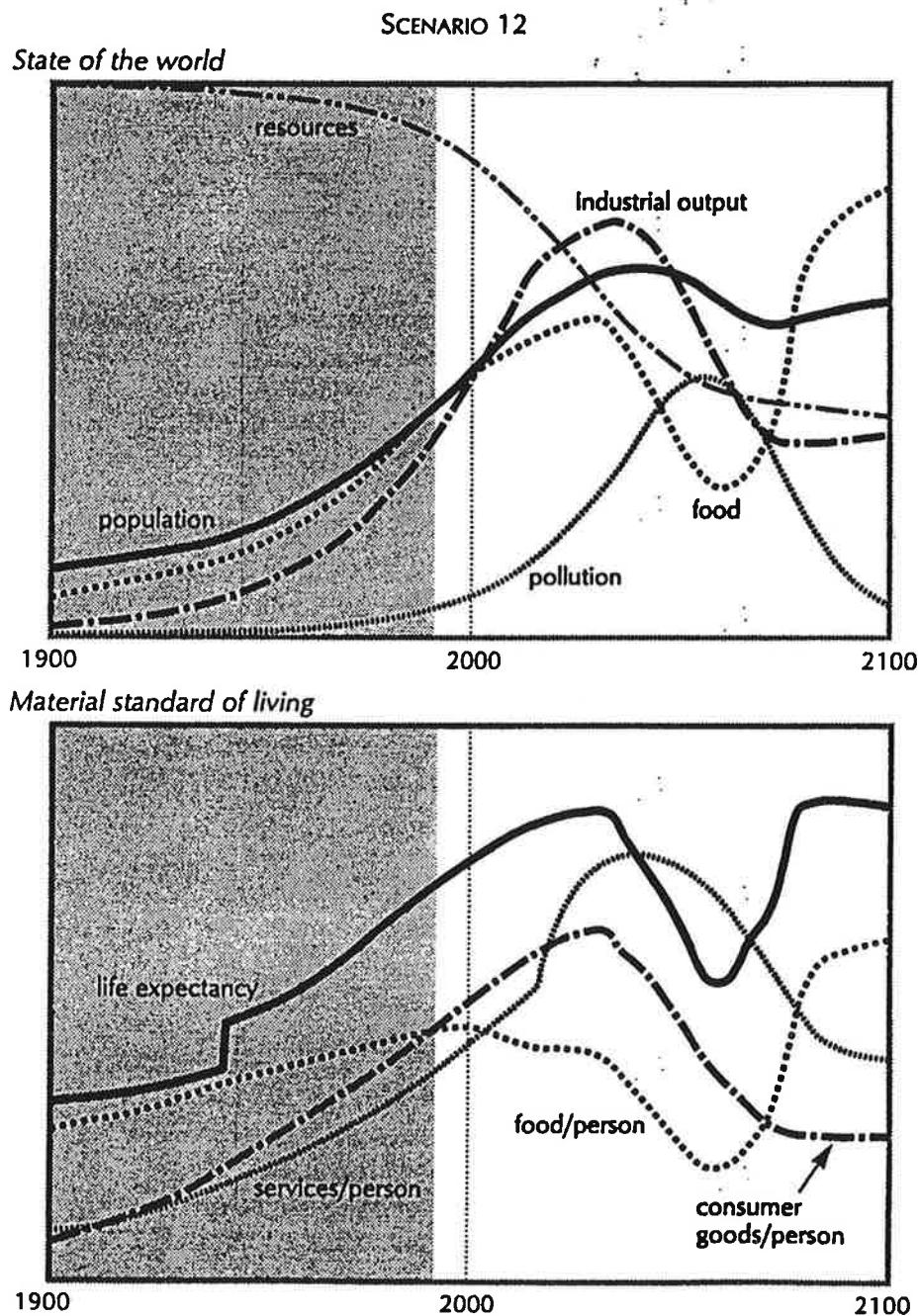
## Scenario 11 STABILIZED POPULATION AND INDUSTRY WITH TECHNOLOGIES TO REDUCE EMISSIONS, EROSION, AND RESOURCE USE ADOPTED IN 1975

This simulation includes all the changes that were incorporated into the previous one, but the sustainability policies are implemented in the year 1975 instead of 1995. Moving toward sustainability 20 years sooner would have meant a considerably lower final population, less pollution, more nonrenewable resources, and a slightly higher material standard of living.



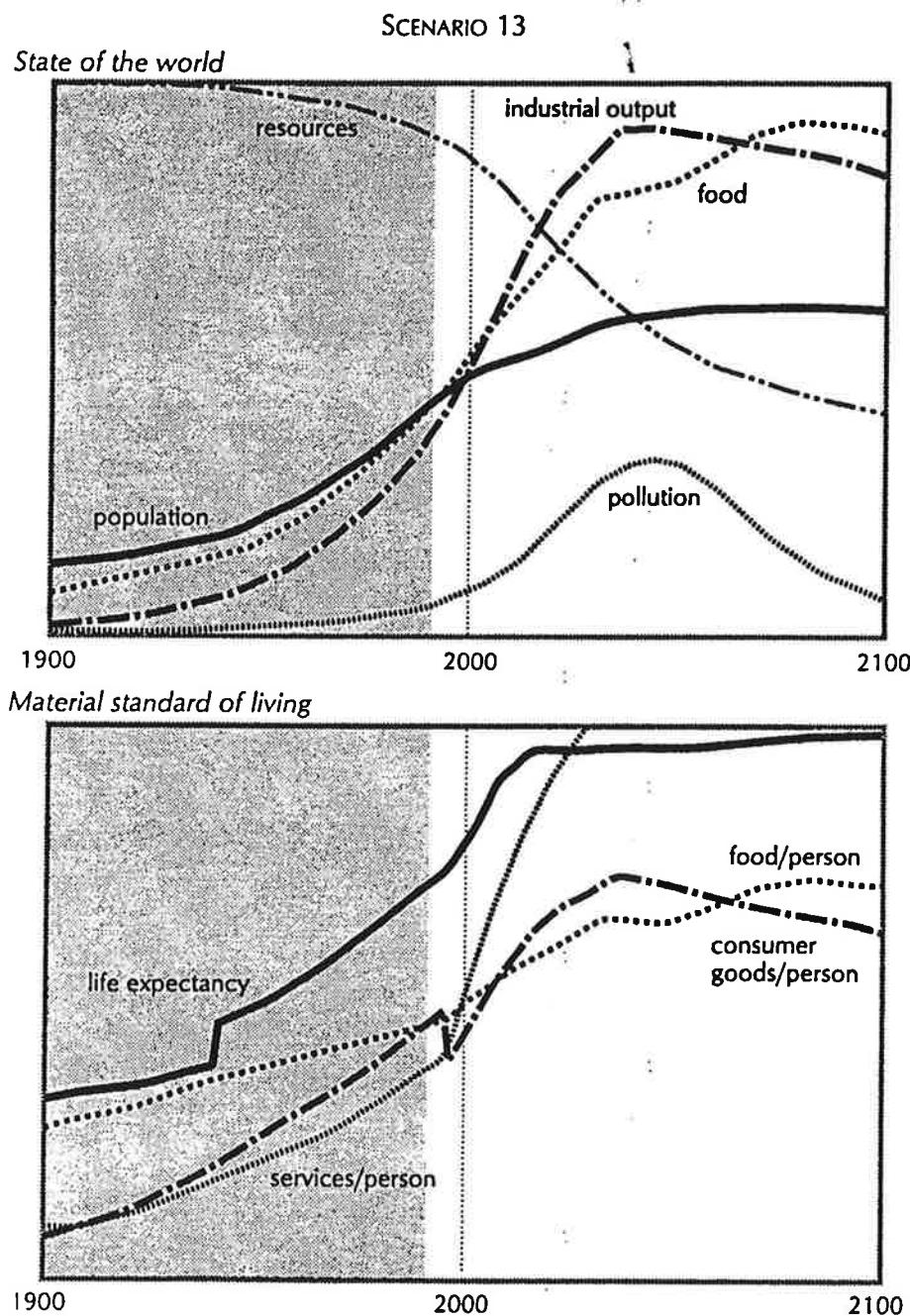
## Scenario 12 STABILIZED POPULATION AND INDUSTRY WITH TECHNOLOGIES TO REDUCE EMISSIONS, EROSION, AND RESOURCE USE ADOPTED IN 2015

Waiting to implement the sustainability policies until the simulated year 2015 allows population, industry, and pollution to rise too high. Even the effective technologies operating in this scenario cannot forestall a decline, although they do manage to reverse the decline at the end of the 21st century.



### Scenario 13 EQUILIBRIUM POLICIES BUT WITH HIGHER GOALS FOR FOOD AND INDUSTRIAL OUTPUT

Using the same general policies as were implemented in Scenario 11, but with much higher demands for food and consumption places much greater stress on the global resource base. Initially the living standard is higher, but by 2100 the simulated world shows clear signs of unsustainability.





## **ANNEXE D - PROGRAMME DE RECHERCHE INITIAL**

*Texte original de l'annexe scientifique du premier contrat, définissant le programme pluriannuel de recherche (Février 1991)*



## PRÉVOIR L'ÉVOLUTION DE LA FLOTTE MONDIALE

1 - on connaît très précisément la composition et l'état de vieillissement présents de la flotte mondiale

Les incertitudes sont grandes en revanche sur ses perspectives de renouvellement c'est-à-dire sur le déclenchement, la nature et le calendrier des investissements en navires neufs qui devront inévitablement et à relativement brève échéance remplacer les navires vieillissants qui acheminent aujourd'hui l'essentiel des échanges internationaux.

2 - on peut tenter d'estimer l'évolution de la flotte mondiale et les processus de son renouvellement à partir d'analyses de type "démographique"

Les résultats de plusieurs travaux conduits selon cette approche ont été publiés. Ils fournissent une estimation de la demande de remplacement directement et strictement liée à l'âge des navires, pour les principales catégories de navires qui composent la flotte mondiale. Ils prennent appui sur quelques scénarios différenciés par les hypothèses retenues quant à la durée de vie technique des navires, et aux possibilités envisageables de prolongation de cette durée.

Selon certains travaux récents de prospective disponibles sur le sujet, la flotte à construire dans les dix ans à venir équivaudrait à plus de la moitié (355 millions de tpl) de l'actuelle flotte mondiale (de l'ordre de 600 millions de tpl)

3 - mais il est des raisons de craindre qu'une approche purement "démographique" du renouvellement de la flotte mondiale n'aboutisse à une impasse

L'exercice se heurte en effet à des difficultés considérables, et en particulier :

\* au caractère hasardeux des hypothèses de durée de vie des navires : L'espérance de vie "technique" des grands types de navires qui composent la flotte mondiale est généralement estimée à une vingtaine d'années, avec, bien entendu, de notables exceptions. Il semblerait aujourd'hui qu'elle puisse être sensiblement prolongée, mais à quel prix ? et à quels risques ?

\* à celui des hypothèses d'évolution des marchés maritimes et de l'incitation à investir. C'est sur ce chapitre que se rencontrent peut-être les questions les plus épineuses :

- coûts d'acquisition des navires neufs (shipbuilding shortage ?)
- de leur financement (shipfinance shortage ?)
- de leur exploitation (seafarers shortage ?)
- évolution (ou plutôt anticipation) des taux de fret sur les différents marchés

\* à celui enfin des hypothèses sur la stabilité ou l'instabilité future de la structure de la flotte mondiale, c'est-à-dire des types de navires qui la composeront : Cette question est d'abord et intimement liée à celle des trafics ( cf. infra ). Mais elle pose aussi, outre la question des navires devenus obsolètes par disparition des trafics auxquels ils sont dédiés, celle du déclassement de technologies de transport qui se révéleraient intolérables compte tenu des seuils d'acceptation en matière de sécurité et/ou de nuisances, entraînant leur disparition ou leur remplacement par des technologies nouvelles.

### **PEUT-ON IMAGINER LES FLOTTES DU FUTUR SANS S'INTERROGER SUR CE QU'ELLES TRANSPORTERONT?**

- peut-on faire une prospective des trafics?

Pour que cela soit possible, il s'agit de voir comment mobiliser des travaux existant dans divers domaines pour en tirer une synthèse pertinente en termes de trafics. De la plus simple prolongation des tendances (qui reste une base de réflexion nécessaire) aux grands travaux de prospective, la gamme des manières d'envisager le futur est large - mais il faut choisir un point de vue et une "perspective de la prospective", pour l'orientation de la recherche et l'interprétation de ses résultats. On peut en première analyse distinguer divers types de matériaux, correspondant à trois points de vue bien caractérisés :

Le point de vue sectoriel fournit des descriptions et prévisions d'activités, pour les principaux trafics, avec un horizon qui va de quelques années à l'an 2000. Elles sont indispensables, pour prendre en compte les tendances lourdes les mieux connues. Leur cohérence est néanmoins problématique, aussi bien au niveau de prévisions différentes sur un même secteur qu'à celui des interactions entre secteurs. Mais c'est leur courte vue qui est le problème principal.

La perspective socio-économique, intégrant l'évolution des besoins et celle des moyens, le développement démographique et les développements ou régressions économiques, permet de structurer la prévision des trafics en fonction d'une dynamique plus globale. Ici apparaissent divers travaux de prospective, et les bilans et prévisions d'organismes internationaux tels que la BIRD, la FAO, etc., qui sont autant de matériaux potentiels pour ce projet.

La perspective écologique apparaît de plus en plus nécessaire pour encadrer cette dynamique dans un réseau de contraintes générales, dont la connaissance connaît actuellement un développement certain. L'écologie mathématique, axée sur l'appréciation quantitative des équilibres et déséquilibres de systèmes complexes, peut fournir des hypothèses et aider à en tester d'autres. La prise en compte croissante de cette perspective par les milieux scientifiques d'une part, les organisations internationales d'autre part, fournira des matériaux nouveaux.

#### **- à quel horizon et dans quelles dimensions?**

S'il s'agissait seulement de prévoir les trafics des années 90, les prévisions sectorielles classiques suffiraient peut-être. Mais les décisions prises d'ici à l'an 2000 n'auront leur plein effet que dans les décades suivantes. Une perspective plus longue est donc nécessaire. Schématiquement, les flottes dont le renouvellement sera imaginé et engagé dans la prochaine décennie seront celles du premier quart du siècle prochain, ce qui assigne à notre réflexion un double horizon : 2000, et 2025 environ (pour "voir" ou imaginer 2025 il faudra évidemment quelques coups de projecteurs plus lointains, notamment au niveau des grands équilibres planétaires...).

Bien que la dimension de cette réflexion soit d'emblée mondiale, les résultats en seront recherchés plus précisément aux niveaux européen et national, si l'on s'en donne les moyens.

#### **- par quelles méthodes?**

##### ***organiser la collecte des matériaux***

Les matériaux potentiels sont des travaux récents, publiés ou non, par les organismes et institutions internationales, les milieux scientifiques et professionnels français et étrangers, etc. Le champ à explorer paraît tellement vaste que l'organisation et les moyens de cette collecte en fonction de la question précise des trafics, et des moyens de traitement et d'analyse, sera une des tâches primordiales.

### ***structurer les cheminements plausibles***

Toutes les hypothèses (même présentées "localement" comme certaines) ne sont pas compatibles entre elles. Il y a plusieurs types de cheminements plausibles, pour ne pas parler de scénarios. Certains de ces cheminements, dans la perspective socio-économique aussi bien que dans la perspective écologique, débouchent sur des scénarios de catastrophe dont l'exploration précise n'est pas notre sujet (qu'importe le bateau si on a le naufrage...). Nous chercherons plutôt quels cheminements possibles peuvent donner un sens à telle ou telle configuration des flottes mondiales, ou quelle configuration correspondrait le mieux aux divers cheminements envisageables.

### ***passer des scénarios globaux à la modélisation des trafics***

Les scénarios ne sont qu'une étape intermédiaire. Au delà, il faut penser "modèle", non pas pour calculer à tout prix l'incalculable, mais pour faire varier les paramètres calculables en fonction des diverses hypothèses globales que constituent les "cheminements plausibles" de l'état du monde. La modélisation permet en outre d'intégrer à mesure les connaissances nouvelles et de faire, dans une optique quantitative, la synthèse permanente du connu.

#### **- et dans quelles conditions?**

Le schéma de recherche développé ci-dessus est ambitieux. Il est en tout cas suffisamment novateur pour qu'une phase exploratoire s'impose, pour mieux en évaluer la faisabilité et les moyens. Cette phase exploratoire peut fournir à elle seule des résultats concrets, sous la forme d'un premier diagnostic. Elle serait mieux valorisée en tant qu'étape préliminaire d'un programme pluriannuel, échelonné sur une période de l'ordre de trois ans et qui pourrait être le suivant :

#### ***phase 1 - exploration matériaux et méthodologie***

Méthodes : enquêtes et bibliographie, recherche et analyse des cheminements possibles et de leur composante "trafics". Premier diagnostic sur les méthodes et sur les résultats. Synthèse flottes/trafics

#### ***phase 2 - formulation, modélisation***

Étude des contraintes et incertitudes, cohérences et incohérences. Établissement d'une situation de base et d'au moins un cheminement général. Traduction en termes de trafics, sur une première ébauche de modèle explicatif global. Synthèse flottes/trafics

#### ***phase 3 - mise en œuvre***

Élaboration du modèle et de son processus d'alimentation, de suivi et d'exploitation