

AVERTISSEMENT

Ce document est le fruit d'un long travail approuvé par le jury de soutenance et mis à disposition de l'ensemble de la communauté universitaire élargie.

Il est soumis à la propriété intellectuelle de l'auteur : ceci implique une obligation de citation et de référencement lors de l'utilisation de ce document.

D'autre part, toute contrefaçon, plagiat, reproduction illicite de ce travail expose à des poursuites pénales.

Contact : portail-publi@ut-capitole.fr

LIENS

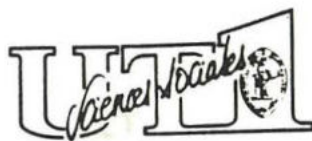
Code la Propriété Intellectuelle – Articles L. 122-4 et L. 335-1 à L. 335-10

Loi n° 92-597 du 1^{er} juillet 1992, publiée au *Journal Officiel* du 2 juillet 1992

<http://www.cfcopies.com/V2/leg/leg-droi.php>

<http://www.culture.gouv.fr/culture/infos-pratiques/droits/protection.htm>

UNIVERSITE DES SCIENCES SOCIALES - TOULOUSE I



**Etude économique des ressources énergétiques dans le
cadre d'une approche globale intégrant l'environnement**

THESE

en vue de l'obtention du

Doctorat en Sciences Economiques (arrêté du 23 novembre 1988)

Présentée et soutenue le 27 mai 1992 par

Sylvie FERRARI**Membres du jury****Alain ALCOUFFE**

Professeur à l'Université de Toulouse I

Jean-Marie MARTIN

Directeur de recherche au CNRS, Université de Grenoble II

FRANÇOIS MORIN

Professeur à l'Université de Toulouse I

Bertram SCHEFOLD

Professeur à l'Université Goethe, Francfort

Patrick COHENDET

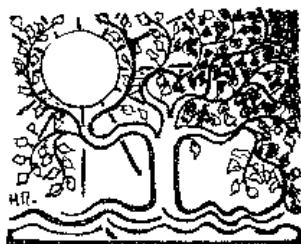
Professeur à l'Université Louis Pasteur, Strasbourg

Jean-Marie FRAYSSEDélégué régional de l'Agence de l'environnement et de la maîtrise
de l'énergie, région Midi-Pyrénées**Michel DELMAS**

Professeur à l'Ecole Nationale Supérieure de Chimie de Toulouse

UNIVERSITE DES SCIENCES SOCIALES - TOULOUSE I

**Etude économique des ressources énergétiques dans le
cadre d'une approche globale intégrant l'environnement**



THESE

en vue de l'obtention du

Doctorat en Sciences Economiques (arrêté du 23 novembre 1988)

Présentée et soutenue le 27 mai 1992 par

Sylvie FERRARI



Membres du jury

Alain ALCOUFFE

Professeur à l'Université de Toulouse I

Jean-Marie MARTIN

Directeur de recherche au CNRS, Université de Grenoble II

FRANÇOIS MORIN

Professeur à l'Université de Toulouse I

Bertram SCHEFOLD

Professeur à l'Université Goethe, Francfort

Patrick COHENDET

Professeur à l'Université Louis Pasteur, Strasbourg

Jean-Marie FRAYSSE

Délégué régional de l'Agence de l'environnement et de la maîtrise
de l'énergie, région Midi-Pyrénées

Michel DELMAS

Professeur à l'Ecole Nationale Supérieure de Chimie de Toulouse

Exclu du Prêt TG 1001. 1992-24

A Jean-Baptiste et Encarnacion.

Remerciements

Ecrire une thèse est l'accomplissement par excellence d'un travail personnel. Cependant, sa réalisation ne pourrait s'effectuer sans l'aide de nombreuses personnes qui interviennent tout au long de sa constitution. Aussi, je souhaite exprimer mes sincères remerciements à tous ceux et celles qui, de près ou de loin, ont apporté leur contribution.

En premier lieu, je tiens à témoigner toute ma gratitude à l'égard de mon directeur de thèse, le professeur Alain Alcouffe, pour sa grande disponibilité et ses nombreux conseils dans la préparation et dans la réalisation de la thèse.

En second lieu, je souhaite m'adresser aux personnes qui ont relu tout ou partie du manuscrit et ont formulé des remarques sur le contenu et sur la présentation. Je remercie donc Jean-Marc Gil, Marie-Hélène Frisch, Patricia Meyer et Hélène Mellaerts. Je remercie particulièrement Hélène Mellaerts pour avoir dessiné le logo qui figure sur la couverture de la thèse.

En troisième lieu, j'exprime mes remerciements au Cabinet Husson, Société d'expertise comptable, qui a gracieusement participé à la mise en forme de la thèse. Je remercie ici Fabienne Saint-Martin, Chantal Gaichies et Nadine Rebaudi qui ont assuré la dactylographie du manuscrit.

Enfin, je tiens à remercier mes parents sans lesquels je n'aurais pu poursuivre mes études universitaires et présenter devant vous aujourd'hui le fruit d'un long investissement intellectuel.

INTRODUCTION GENERALE

Les ressources énergétiques ont toujours joué un rôle prépondérant dans le développement des civilisations humaines et plus particulièrement dans la complexification des sociétés. Celles-ci ont inventé et inventent encore des instruments exosomatiques aptes à transformer l'énergie disponible en énergie utile pour l'homme afin de satisfaire des besoins nombreux et croissants (nourriture, éclairage, chauffage, force motrice ...). Cette évolution de nature discontinue, ponctuée par des ruptures ou crises énergétiques, s'est traduite par la succession de convertisseurs toujours plus puissants capables d'exercer une meilleure maîtrise de l'énergie, grâce à l'amélioration constante des rendements, et de générer ainsi une dynamique cyclique dans l'histoire de l'énergie des pays occidentaux.

L'analyse des crises énergétiques montre que, à moment donné, le développement d'une société peut être compromis si aucun nouveau convertisseur ou/et aucune nouvelle source d'énergie n'est découvert. La crise du bois de feu en Grande-Bretagne au 18ème siècle, qui conduira à la disparition du système énergétique médiéval, en constitue une illustration. Elle a pu être résolue grâce au développement du charbon et à l'apparition de la machine à vapeur dans l'économie. L'augmentation de cette production énergétique et les améliorations des rendements de la machine à vapeur ainsi que sa diffusion au 19ème siècle ont permis l'avènement d'un système énergétique de type capitaliste avec l'accroissement des productions -développement de l'industrie du coton notamment- et l'abaissement des coûts (1).

Ce type de crise peut être qualifiée de structurelle dans la mesure où le système énergétique établi est contraint de se modifier en profondeur dans sa structure ; la solution à la crise n'est possible que si son mode de fonctionnement et d'organisation est modifié. Dans l'exemple cité, le développement de l'économie britannique aurait nécessairement été compromis si d'une part les structures sociales et économiques sur lesquelles s'appuyaient le système énergétique médiéval étaient demeurées inchangées et, d'autre part, si le progrès technique n'avait pu autoriser une plus grande disponibilité d'énergie - rôle de la machine à vapeur dans l'exploitation des mines de charbon.

(1) J-C DEBEIR, J-P DELEAGE, D. HEMERY, *Les servitudes de la puissance*, Flammarion, 1986, p.154-166.

A l'origine d'une telle crise figure la pénurie absolue d'une source d'énergie particulière, le bois. Aujourd'hui, le visage de la crise associée à la pénurie n'existe plus dans les pays industrialisés où règne l'abondance énergétique, mais est très présent dans les pays en développement. La crise du bois de feu constitue une réalité dramatique : le bois, principale source de combustible, se raréfie sous la pression de besoins grandissants atisés par une croissance démographique explosive. Elle se traduit alors des pressions environnementales qui conduisent à l'émergence d'une crise écologique grave avec la déforestation et la dégradation des sols (1). Le règlement de cette crise endémique et structurelle ne peut là encore être envisagé sans le bouleversement du système énergétique où à la fois les améliorations des rendements des technologies et les substitutions interénergétiques apporteront une réponse satisfaisante.

Mais il existe d'autres types de crises énergétiques qui n'ont rien à voir avec une pénurie. La deuxième moitié du 20ème siècle apparaît comme une période historique intéressante de ce point de vue.

Ainsi, les événements politiques qui conduisent au choc pétrolier de 1973 puis à celui de 1979 sont la traduction de deux crises énergétiques ponctuelles, aux conséquences cependant structurelles pour de nombreux pays importateurs de pétrole (2), dont la caractéristique essentielle est de ne pas remettre en cause le système énergétique dominant basé sur le "tout pétrole". Plus près de nous, la guerre du Golfe en 1991 est le détonateur d'une crise ponctuelle de ce système énergétique qui exprime la volonté de la part de certains Etats de garantir à tout prix l'approvisionnement en pétrole dans le monde. Ces événements de nature conjoncturelle soulignent la fragilité du système d'approvisionnement pétrolier mondial, la vulnérabilité des économies occidentales et leur dépendance aigüe envers le Moyen-Orient, et expriment aussi la lutte pour le partage de la rente pétrolière (3).

(1) J-P DELEAGE, *Histoire de l'écologie, une science de l'homme et de la nature*, La découverte, 1991, p.283-285.

(2) J. PERCEBOIS, *Economie de l'énergie*, Economica, 1989, p.14-15. Compte tenu de l'envolée des prix du pétrole brut, les économies des pays industrialisés tentent de réduire leur dépendance énergétique en favorisant les énergies nationales et en mettant en oeuvre une politique d'économie et de rationalisation de l'énergie.

(3) P. CRIQUI, "Un nouveau partage de la rente", *Le Monde*, 25 septembre 1990, p.27.

Comme l'écrit J.P DELEAGE, "à chaque choc, l'enjeu a été le même : repartager une rente pétrolière, pratiquement appropriée jusqu'en 1970 par les seules grandes puissances occidentales, entre ces dernières et les nouveaux acteurs du marché" (1).

Et d'ajouter : "L'ère du pétrole à bon marché est définitivement close".

Nous sommes donc loin d'une quelconque pénurie d'énergie ! ...

Crise d'approvisionnement, crise liée à des enjeux de pouvoirs, nous connaissons d'autres types de crises plus graves qui peuvent mettre en péril cette fois-ci le système énergétique des économies industrialisées. La seconde moitié du 20ème siècle est marquée par l'émergence d'une nouvelle source d'énergie, l'énergie nucléaire.

Son développement rapide dans les années 1970-80 sera d'ailleurs considéré comme une réponse incontournable au premier choc pétrolier dans l'ensemble du monde occidental. Cependant, cette énergie recelle les ferments d'une crise énergétique à deux dimensions que l'avenir allait bientôt révéler à l'humanité (2).

Tout d'abord, la première dimension concerne la sûreté nucléaire. De nombreux accidents nucléaires sont intervenus depuis les années cinquante avec deux précédents majeurs : Three-Miles-Island en 1979 et Tchernobyl en 1986 (3). C'est assurément avec ce dernier accident que la remise en cause de l'énergie nucléaire a été la plus forte, générant une crise de confiance générale. L'effondrement de la crédibilité s'est traduit par un retournement de tendance dans la construction de nouvelles unités de fonctionnement dans le monde avec des annulations de commandes et des reports nombreux. La crise du nucléaire dans les pays industrialisés a donc pour origine des facteurs de nature socio-économiques fondés sur une crise de confiance, crise déjà amorcée dans les années 1970 aux Etats-Unis et dans quelques pays européens (Allemagne et France principalement).

Cependant, comme le soulignent P. RADANNE et L. PUISEUX, le danger ne provient pas que d'accidents majeurs qui sont rares mais aussi et surtout de nombreuses défaillances

(1) J-P DELEAGE, "Maîtriser l'énergie pour un monde équitable", *Stratégies énergétiques, biosphère et sociétés*, octobre 1991, p.14.

(2) Il existe aussi deux autres aspects à l'origine de la crise du nucléaire : la crise des débouchés (baisse des consommations énergétiques après les chocs pétroliers et désintérêt des pays en développement pour cette énergie trop honéreuse) et une crise de compétitivité. A ce propos, se reporter à : J-M CHEVALIER et al., *Economie de l'énergie*, Dalloz, 1986, p.98-100.

(3) - J. PERCEBOIS, opus cité, p.636-637.

- P. RADANNE, L. PUISEUX, *L'énergie dans l'économie*, Syros, 1989, p.101-116.

dont la fréquence et la gravité augmentent au fur et à mesure que les installations vieillissent (1). La situation des centrales nucléaires à l'Est illustre ce propos : mis en service il y a vingt ans, les réacteurs VVER (à uranium enrichi - eau ordinaire) sont aujourd'hui vétustes, ce qui laisse présager des incidents dans les années à venir (2).

Enfin, la crise du nucléaire a une seconde dimension tout aussi préoccupante que la première : une production croissante de déchets radioactifs. Parmi eux, il existe ceux que l'on appelle les déchets d'activité intermédiaire et les déchets de haute activité à vie longue. Leur caractéristique majeure est qu'ils demeurent nocifs sur des périodes de plusieurs dizaines de milliers d'années et plus. A l'heure actuelle, la gestion à long terme de ces déchets n'a pas été mise en oeuvre et reste au stade d'une simple étude de solutions possibles (envoi dans l'espace, enfouissement dans les sédiments marins, stockage dans les couches géologiques profondes) (3). Nous allons ainsi léguer aux générations futures des résidus dangereux qu'une société peu scrupuleuse n'aura su maîtriser.

Dans le cas de la France, A. GLASBERG écrit : "L'énorme programme électronucléaire mis en place dans les années 1960-70 n'a pas pris en compte le problème posé par les déchets radioactifs. Il a fallu attendre le début des années 1980, soit plus de 35 ans après le début de l'activité nucléaire, pour que ce problème soit pris en compte" (4).

Incontestablement, l'énergie nucléaire est source d'une crise structurelle au sein du système énergétique dominant à travers les pollutions que cette énergie génère. Aux côtés de ces différentes formes de pollution, il existe d'autres signes de dysfonctionnement du système énergétique mis en évidence par les autres énergies fossiles (pétrole, charbon, gaz naturel) qui révèlent l'émergence d'une nouvelle crise structurelle au sein du système.

Le système énergétique issu de la Révolution Industrielle n'a cessé depuis lors de libérer dans son milieu environnant des quantités de rejets nocifs (dioxyde de carbone, dioxyde de soufre et oxydes d'azote). Il se trouve ainsi dans l'incapacité de maîtriser et d'éliminer ces polluants qui s'accumulent alors à la fois dans le temps et dans l'espace.

Nous comprenons bien qu'un système énergétique à moment donné peut sous l'influence de facteurs externes ou internes s'acheminer vers une crise grave, telle que sa survie est

(1) P. RADANNE, L. PUISEUX, opus cité, p.106.

(2) J-P TUQUOI, "Centrales nucléaires à l'Est : l'économie contre la sûreté", *Le Monde*, 24 mars 1992.

(3) OCDE, *L'état de l'environnement*, 1991; p.249-250.

(4) A. GLASBERG, "Déchets nucléaires : la gestion est pour demain", *Terre vive*, Janvier 1992, n°2, p.38.

menacée. Par le passé, le développement des sociétés humaines s'appuyait sur des systèmes énergétiques qui ne menaçaient pas la vie des hommes, ne perturbaient que très localement l'environnement. L'évolution de tels systèmes ne pouvait donc être le fait que de crise locale de nature structurelle ou conjoncturelle. Or, il semble qu'avec l'industrialisation des sociétés, un seuil ait été franchi. Le développement de la civilisation technologique s'est accompagné d'une accélération du progrès technique et d'une croissance continue des consommations d'énergie et de matières premières qui ont conféré aux pollutions générées une dimension planétaire (répercussions à l'échelle du globe).

Le système énergétique fortement localisé sur la base fossile est à l'origine d'un phénomène nouveau porteur d'une crise majeure : d'une part, ce système exerce des perturbations non seulement au niveau local mais surtout au niveau global ou planétaire, et d'autre part, il menace directement les générations présentes et indirectement les générations futures. Nous assistons ainsi à un changement d'échelle à la fois spatial - du local au planétaire - et temporel - rôle du très long terme.

Concrètement, cela signifie que le système énergétique exerce une menace au niveau du fonctionnement des écosystèmes comme au niveau de celui de la biosphère en perturbant ses équilibres biogéochimiques (en particulier : le cycle du carbone, le cycle de l'azote et celui du soufre). Les émissions de gaz carbonique, en modifiant la composition chimique de l'atmosphère, contribuent à l'accroissement de l'effet de serre, d'où une influence très forte sur l'évolution du climat. Or, alors que le gaz carbonique est le principal gaz à effet de serre, 80 % des rejets atmosphériques de CO₂ ont pour origine la combustion des ressources fossiles !

Aux côtés de l'effet de serre, d'autres pollutions de nature globale existent : les pluies acides, la diminution de la couche d'ozone (rôle surtout des chlorofluorocarbones) et les accidents nucléaires majeurs. De telles pollutions en se dispersant loin de la source d'émission deviennent des menaces pour l'ensemble des êtres vivants. Leurs effets menacent donc à des degrés variables la survie de la biosphère (1).

Le système énergétique issu de la Révolution Industrielle est ainsi le vecteur de pollutions et de détériorations de nature globale.

"Le développement économique moderne, c'est à dire essentiellement la richesse de l'Occident, dont la puissance (au sens énergétique du terme) dérive de la fantastique dépense du stock des ressources naturelles accumulées par l'immense histoire géologique, pertur-

(1) S. FAUCHEUX, J-F NOEL, *Les menaces globales sur l'environnement*, La Découverte, 1990, p.10-39.

be brutalement les rythmes de la biosphère, altérant le cycle du carbone comme l'ensemble des autres cycles biogéochimiques qui interagissent les uns avec les autres. L'activité industrielle rejette depuis un siècle dans l'atmosphère des quantités bien plus considérables de carbone que l'activité volcanique : à l'échelle géologique, la révolution industrielle est une puissante éruption thermo-industrielle !" (1)

Les rapports entre les hommes et la biosphère sont donc totalement bouleversés dans l'espace mais aussi dans le temps. Les pollutions globales interviennent sur une échelle de temps longue qui concerne non plus une seule génération mais plusieurs.

Les enseignements tirés de l'histoire de l'énergie des pays industrialisés sont les suivants :

- avec l'évolution complexifiante des technologies destinées à maîtriser l'énergie, les activités humaines exercent sur le milieu naturel des pressions au niveau local et de plus en plus, depuis le milieu du 20ème siècle, au niveau global

- le système énergétique dominant basé sur les ressources fossiles constitue une menace à très long terme pour les générations futures (risque de blocage du processus de développement). La contrainte des rejets issus des activités énergétiques remet finalement en cause l'abondance relative des ressources fossiles dans les économies développées. Il existe donc une crise grave qui menace la pérennité de ce système énergétique, dont l'origine se situe dans la non prise en compte des rapports de dépendance réciproques existant entre la nature et les sociétés humaines. Dès lors, le système énergétique est naturellement dans l'impossibilité de s'adapter et s'achemine vers une rupture inévitable. L'avènement d'un nouveau système énergétique constitue une réponse à l'impasse dans laquelle le système antérieur avait abouti.

Nous comprenons alors qu'il est nécessaire de considérer la relation énergie-environnement dans un nouveau cadre conceptuel. La réflexion que nous engageons s'inscrit dans un paradigme de nature holiste, à l'échelle de la biosphère, où le concept de changement global apparaît essentiel.

Selon la définition proposée par F. DE ROOSE et P. VAN PARIJS, le changement global recouvre les modifications qui affectent les propriétés physico-chimiques de l'écosystème terrestre dans son ensemble (2). Ce concept traduit la suprématie des processus de changement externes d'origine énergétique affectant la biosphère sur les processus de chan-

(1) J. GRINEVALD, "L'effet de serre de la biosphère, de la révolution thermo-industrielle à l'écologie globale", *Stratégies énergétiques, biosphère et sociétés*, mai 1990, p.21.

(2) R. DE ROOSE, P. VAN PARIJS, *La pensée écologiste*, De BoeckWesmael, 1991, p.39.

gement internes de celle-ci.

Autrement dit, le système énergétique remet en cause les mécanismes de régulation de la biosphère. Une démarche intéressante permettant de prendre en compte cette dimension nouvelle est constituée par l'approche globale. Une approche globale est une démarche intellectuelle qui consiste à étudier la dynamique évolutive - rôle des processus de changement externes et internes - et interactive - avec la prise en compte de l'interdépendance associée aux échanges de matière de d'énergie - au niveau d'une totalité organisée. L'approche globale du système énergétique met l'accent sur les relations de caractère global existant entre ses éléments et l'environnement naturel, sur le rôle des processus externes de changement de l'environnement naturel et sur l'ouverture du système énergétique sur la biosphère, ouverture nécessaire pour assurer son fonctionnement et maintenir sa structure. L'environnement naturel, par définition, se rapporte aux éléments naturels de la biosphère nécessaires aux êtres vivants (air, eau, sol ...) ainsi qu'aux équilibres écologiques, biologiques et physico-chimiques (1).

L'approche globale contient implicitement la notion d'environnement naturel, ce qui lui confère une dimension pluridisciplinaire essentielle. En effet, dès que l'on souhaite comprendre l'origine des changements globaux, leurs conséquences à court et à très long terme sur l'environnement naturel, et formuler des décisions à prendre afin de les gérer, l'approche doit intégrer des "ingrédients" conceptuels afférents à plusieurs disciplines. Les nombreux programmes de recherche internationaux destinés à nous éclairer sur les changements de l'environnement planétaire expriment l'intérêt d'une telle approche de la réalité (2).

L'approche globale du système énergétique va ainsi intégrer dans son champ d'analyse l'économie, la biologie, la physique, la chimie et l'écologie. Les changements de grande ampleur qui affectent la biosphère mettent au premier rang l'écologie et la physique. Concernant l'écologie, c'est plus précisément l'écologie globale qui est concernée avec les apports de Vernadsky, de Lotka ou plus près de nous de Lovelock et de Holling (3). Concernant la physique, c'est la thermodynamique dans ses développements récents

(1) J.A. TERNISIEN et al., *Dictionnaire usuel de l'environnement et de l'écologie*, Guy Le Prat éditeur, 1981, tome 1, p.122.

(2) C'est le cas du programme HDGCP sur les dimensions sociales des changements de l'environnement planétaire, du programme IGBP ou programme international sur la géosphère et la biosphère, et du programme MAB sur l'homme et la biosphère.

(3) Pour un approfondissement, se reporter à J-P DELEAGE, *Histoire de l'écologie*, La découverte, 1991, chapitres 9 et 10, p.198-244.

avec l'étude des systèmes ouverts qui est véritablement révélatrice (travaux de I. PRIGOGINE). Ces deux disciplines sont d'ailleurs fortement connectées par deux vecteurs : l'énergie et la matière.

L'approche globale, qui contient la problématique thermodynamique et écologique - biogéochimique -, peut ainsi fournir une grille de lecture et d'analyse de la dimension planétaire du "métabolisme énergétique" (1). Elle implique de renoncer au monde mécanique et déterministe newtonien qui ignore l'irréversibilité des transformations du monde réel, crée la plénitude d'un état d'équilibre et impose à l'homme un ordre naturel. L'approche globale appartient au monde évolutif où l'entropie oriente l'irréversibilité des processus, où le vivant se situe loin de l'équilibre et où l'homme bouleverse l'ordre naturel qui le contient. C'est l'univers de la destruction créatrice avec les structures dissipatives de I. PRIGOGINE où la complexification de la matière s'effectue loin de l'équilibre sous l'effet d'un apport d'énergie infime.

Enfin, l'approche globale s'appuie aussi sur les enseignements de l'analyse systémique afin de fournir un éclairage sur le fonctionnement du système énergétique dans la biosphère, c'est à dire du biosystème. Les relations d'interdépendance entre les différents éléments du biosystème sont essentielles. Elles traduisent des échanges, des coopérations, des compétitions, des conflits entre les différents niveaux d'organisation et génèrent des bouclages et des rétroactions destinés à assurer une cohérence de l'ensemble des niveaux. L'existence du tout et de ses parties se conditionnent donc mutuellement.

Au coeur du paradigme global, c'est le règne de la coévolution, évolution associée à l'interdépendance. Ainsi, le développement à long terme doit nécessairement prendre en compte l'interdépendance des systèmes économiques et écologiques, et intégrer la préservation du capital biophysique dans un souci d'équité intergénérationnelle.

Dans un monde en pleine expansion démographique et contraint par des limites naturelles (capacité de charge de la biosphère), la voie à suivre n'est pas celle d'un développement assis sur le gaspillage énergétique, mode de développement à l'origine de l'industrialisation des pays occidentaux, mais celle d'un nouveau développement : le développement

(1) Cette expression s'inspire directement de celle de "métabolisme industriel" développée par R.U. AYRES. Selon l'auteur, elle signifie que le système économique fait de l'énergie et de la matière une utilisation qui ressemble beaucoup à celle qu'en font les organismes biologiques et les écosystèmes. R.U. AYRES, "Le métabolisme industriel et les changements de l'environnement planétaire", Revue internationale des sciences sociales, août 1989, p.401-412.

"soutenable" (1).

Un tel développement est conditionné par la disponibilité de sources d'énergie abondantes et non polluantes. Il exprime le respect de l'environnement naturel. Dans le dernier rapport de L.R BROWN, un système énergétique "viable" est ainsi esquissé ; il est basé sur la limitation des énergies fossiles et sur le rejet de l'énergie nucléaire (2).

Compte tenu du rôle du système énergétique dominant dans la dimension planétaire des changements, de nouvelles sources d'énergie doivent être développées et de nouveaux choix technologiques doivent être encouragés afin de réduire encore les consommations d'énergie fossiles dans les pays industrialisés et de les limiter dans les pays en développement. Il apparaît essentiel que les pays industrialisés aident financièrement et technologiquement ces derniers afin de stabiliser - et si possible réduire - rapidement les pollutions issues des activités énergétiques. Dans la perspective de la conférence de Rio en Juin 1992, des stratégies actives de limitation des rejets de CO₂ pourraient être décidées afin de prendre en compte la menace du changement climatique à très long terme. Il faut en effet préciser que l'objectif de ce "sommet planétaire" est la ratification d'une convention destinée à préserver les générations futures de tout phénomène irréversible relatif au changement climatique.

Dans un contexte d'incertitudes sur les effets des changements globaux à très long terme, il apparaît cependant essentiel de reconsidérer le rôle modérateur des énergies renouvelables au sein de l'environnement naturel et la nécessité d'accroître l'efficacité énergétique des convertisseurs afin de pouvoir répondre à l'accroissement des besoins énergétiques mondiaux généré par l'évolution démographique et l'industrialisation des pays en développement.

Nous proposons ainsi d'engager une réflexion sur la viabilité à très long terme du système énergétique. Cette réflexion se décompose en deux grandes parties.

La première a pour objet de nous éclairer sur la structure, l'organisation et l'évolution à long terme du système énergétique. Cette partie se divise en deux étapes. La première s'intéresse à la dimension économique et physique des ressources énergétiques. L'appro-

(1) Ce concept est au centre d'une redéfinition des rapports entre les activités humaines et l'environnement. Se reporter à : Commission mondiale pour l'environnement et le développement, *Notre avenir à tous*, Ed. du Fleuve, 1988.

(2) L.R. BROWN, *L'état de la planète*, Economica, 1991, p.31-60.

che historique du système énergétique des pays industrialisés révèle l'utilisation différenciée du patrimoine énergétique selon le stade de développement auquel une société accède à moment donné. Cela se traduit par une profonde inertie d'un système largement dominé par les ressources d'énergie fossiles. Cette inertie est de plus renforcée par les effets du système énergétique sur la biosphère, effets qui vont intervenir avec plus d'acuité dans un contexte de besoins énergétiques croissants - rôle essentiel des pays en développement -.

La seconde étape va révéler la nécessité de trouver une juste adéquation des besoins des générations successives à la disponibilité des ressources dans le temps. Dans le cadre d'une gestion intertemporelle intégrant la relation énergie-biosphère, le valorimètre monétaire ne constituant pas une réponse satisfaisante - tous les éléments de la biosphère ne sont pas inclus dans la sphère marchande d'une part, et les éléments de la nature sont dotés de valeurs non marchandes d'autre part -, nous proposerons une autre voie avec le principe de conservation. Ce principe éthique, principe juste et équitable, peut autoriser la satisfaction de l'ensemble des besoins énergétiques sans compromettre la pérennité du patrimoine énergétique et sans altérer les régulations opérant au sein de la biosphère.

Cependant, l'application de ce principe suppose d'adopter une approche globale du système énergétique. C'est précisément le contexte conceptuel dans lequel s'inscrit la deuxième grande partie de notre travail. Cette partie va s'intéresser aux lois d'évolution du système énergétique et démontrer la nécessité de s'orienter vers un sentier énergétique nouveau avec l'émergence d'une structure dotée d'une grande efficacité et d'une grande flexibilité d'adaptation. Dans une première étape, l'intégration des principes thermodynamiques et de quelques principes écologiques essentiels va traduire la nature dissipative du système énergétique et les limites de son fonctionnement. Le système énergétique se définit alors comme un système thermodynamique ouvert sur la biosphère. La prise en compte des interdépendances évolutives - ou coévolution - est alors primordiale dans l'évolution à très long terme du biosystème. Le système énergétique est alors contraint par les lois de la biosphère qu'il ne peut plus ignorer.

Finalement, le système énergétique doit évoluer vers une structure nouvelle où la maîtrise de l'évolution entropique est possible grâce à l'élévation du rendement énergétique du système. La deuxième étape de notre travail a pour finalité d'étudier les voies possibles d'une transition vers un tel système énergétique que nous qualifions de soutenable. La transition est une phase importante : c'est pendant cette période que des choix énergétiques et technologiques vont être effectués sur la base du critère de l'irréversibilité, ceci dans un

contexte d'information croissante et d'incertitudes.

Cependant, comme la maîtrise de l'évolution entropique suppose un changement de paradigme, elle suppose la mise en oeuvre de moyens à l'échelle de la biosphère. J. GRINEVALD écrit : "La dérive anthropogénique de l'effet de serre est le type même de problème socio-écologique global, et seul des réponses cohérentes inspirées d'une perspective globale, non seulement internationale mais aussi réellement biosphérique, peuvent avoir quelque chance de réussir dans le long terme" (1).

Dans ces conditions, elle ouvre la voie de la recherche d'un nouvel ordre orientée par une conscience planétaire seul capable de répondre aux défis lancés par l'homme au cours du 20ème siècle dans ses activités énergétiques.

(1) J. GRINEVALD, opus cité, p.25.

PREMIERE PARTIE : STRUCTURE, EVOLUTION ET GESTION A LONG TERME DU PATRIMOINE ENERGETIQUE

INTRODUCTION

L'objet de cette première partie est d'étudier les ressources énergétiques à travers la notion de système énergétique. Cela suppose de repérer les différentes sources d'énergie disponibles et comprendre comment elles peuvent satisfaire les besoins humains. Nous proposons d'abord une approche dynamique du système énergétique destinée à nous éclairer sur l'état d'inertie dans lequel il se trouve. La relation énergie-développement est au coeur du processus d'évolution du systèmes énergétique dont le vecteur fondamental est constitué par la technologie. Nous verrons par ailleurs quel type de relations s'établissent entre le système énergétique et la biosphère, relations qui ont été ignorées par le passé et qui pourtant sont essentielles pour réaliser le développement des sociétés. En effet, les enseignements tirés de l'évolution passée montrent qu'il est nécessaire d'harmoniser le développement avec les dotations disponibles.

Nous serons ainsi amené à intégrer la relation énergie- biosphère dans la perspective d'une gestion à long terme des ressources énergétiques. Considérant que l'évaluation monétaire ne peut guider une allocation optimale du point de vue écologique, nous présenterons le principe de conservation, principe qui autorise le respect de la biosphère et assure l'équité intergénérationnelle. Dans ces conditions, le patrimoine énergétique peut-être préservé sans que les besoins des générations présentes et futures ne soient compromis.

PREMIERE SOUS-PARTIE :

ORGANISATION DES RESSOURCES ENERGETIQUES ET SPHERE
ECONOMIQUE : LES RELATIONS D'INTERDEPENDANCE DES NI-
VEAUX PHYSIQUE ET ECONOMIQUE

"De tous les traits qui caractérisent le progrès économique des peuples civilisés, le premier qui par ses rapports avec les phénomènes de la production appelle l'attention est l'extension continue et ce semble illimitée de la puissance que l'homme exerce sur la nature..."

J-S MILL, Principes d'économie politique.

CHAPITRE 1 : L'EVOLUTION DU SYSTEME ENERGETIQUE : VERS UN ETAT D'INERTIE

Introduction

L'histoire du système énergétique est orientée par le développement des sociétés à travers un vecteur fondamental : le vecteur technologique. Son champ d'analyse se limite aux pays issus de la Révolution Industrielle. Ainsi, l'évolution du système technique est au coeur de la dynamique du système énergétique. Les innovations technologiques ont permis de mieux maîtriser l'énergie et d'offrir aux sociétés une base énergétique croissante pour assurer leur développement. Cependant, un profond déséquilibre existe aujourd'hui entre les ressources énergétiques selon leur nature : les énergies de stocks sont largement dominantes alors que les énergies de flux sont très marginales. L'objet de ce premier chapitre est de donner un éclairage sur l'évolution du système énergétique en s'appuyant sur la dimension technologique et sur les dotations terrestres de l'humanité, dotations dont l'appréhension quantitative et qualitative demeure limitée.

Section 1 - Le système énergétique

§ 1 - La notion de système énergétique

Aucune société ne peut se passer d'énergie. Selon les stades de son évolution, elle aura accès avec plus ou moins grande facilité à l'énergie brute afin de la transformer pour la satisfaction des besoins humains.

Les différentes transformations vont dépendre de conversions multiples qui seront obtenues au moyen de convertisseurs naturels biologiques ou artificiels. Les convertisseurs biologiques - force humaine, plantes, force animale - furent utilisés par l'homme dans les sociétés primitives. Au fur et à mesure de leur développement, elles inventèrent les convertisseurs artificiels - force du vent captée par une voile, moteur à explosion, machines à vapeur...

"Tandis que le développement de type "pré-industriel" s'appuie surtout sur l'énergie qui peut

être captée par des convertisseurs biologiques, le développement de type "industriel" s'appuie surtout sur l'énergie qui peut être captée par des convertisseurs artificiels". (1)

Il apparaît très clairement que l'aptitude à un moment donné de capter et de transformer l'énergie naturelle dépend du stade de développement où la société est parvenue.

Il y a un lien étroit entre les transformations et l'évolution de la société elle-même : certains convertisseurs artificiels n'apparaîtront qu'à un stade avancé du développement de la société - structures économiques, sociales et politiques élaborées - et leur invention contribuera à l'évolution de la société considérée. Ces transformations constituent ainsi une activité sociale à part entière.

Etudier l'histoire de l'énergie, c'est donc aussi étudier l'histoire des techniques et leur contrôle par les sociétés qui se sont succédées dans le temps.

L'histoire du contrôle social des convertisseurs va mettre en évidence la succession des différentes sources d'énergie. Pour J.P. DELEAGE (2) "chaque société combine de façon originale un ensemble de filières organisées en systèmes énergétiques définis par deux ensembles d'éléments". Le premier ensemble se compose des caractéristiques géographiques et techniques des filières avec les techniques d'approvisionnement en énergie primaire, les formes de l'énergie finale, les rapports de concurrence/complémentarité entre filières. Cette première composante traduit l'évolution des sources d'énergie, des convertisseurs et de leurs rendements énergétiques. Le second ensemble se compose des formes d'appropriation qui gèrent l'agencement des convertisseurs, des différents modes de consommation de l'énergie et de la gestion des sources d'énergie.

Il existe donc des liens entre les formations sociales et les formes de production de l'énergie qui ont induits dans la plupart des systèmes énergétiques un phénomène d'inertie majeur. Pour l'auteur, le passage d'un système énergétique à un autre ne peut se faire sans une crise majeure : "une incapacité évidente à répondre aux sollicitations du système social".

(1) C. M. CIPOLLA, "Sources d'énergie et histoire de l'humanité", *Annales Economies, Sociétés, Civilisations*, n°3, mai-juin 1961, p.532.

(2) J-P DELEAGE, "L'homme et l'énergie au cours des âges", *Les Cahiers Français*, n°236, mai-juin 1988, p.9.

Le système énergétique est ainsi défini comme "la combinaison originale de diverses filières de convertisseurs qui se caractérisent par la mise en oeuvre de sources d'énergie déterminées par leur interdépendance, à l'initiative et sous le contrôle de classes ou de groupes sociaux, lesquels se développent et se renforcent sur la base de ce contrôle". (1)

La sphère sociale joue donc un rôle essentiel dans l'essor et la régression des systèmes énergétiques. Ainsi, la diffusion de la machine à vapeur va entraîner la domination du capital sur le travail et s'intégrer totalement dans le système économique capitaliste.

Une autre définition du système énergétique nous est donnée dans l'ouvrage collectif "Economie de l'Energie"(2). Le système énergétique est "l'ensemble des processus technologiques, économiques et sociaux mis en action pour transformer l'énergie "sauvage" en énergies "domestiques", afin de satisfaire les besoins en chaleur, lumière, force motrice et impulsion électrique". Trois niveaux interdépendants sont déterminés : un niveau physique, un niveau technico-économique et un niveau monétaire. La cohérence du système énergétique s'exprime par l'interdépendance des trois sous-systèmes par son fonctionnement par son fonctionnement-processus itératif- et par sa finalité -satisfaction des besoins-.

Chaque sous-système met en évidence une approche particulière du système énergétique.

L'analyse physico-économique le caractérise par un ensemble de flux physiques. A ce stade, les différentes conversions sont étudiées (transformations de l'énergie libre captée dans l'environnement en énergie utile). A toute transformation correspond une ou plusieurs technologies -champ du physiquement possible-.

L'analyse technico-économique le caractérise par les filières énergétiques. Ce sont des filières de production articulées en termes de technologie, de marchés et de capitaux. Le système énergétique est alors appréhendé comme un ensemble articulé d'activités techniques, économiques et sociales.

Enfin, le système énergétique est caractérisé par l'analyse en terme de prix. Ce sous-système tient compte des caractéristiques techniques et physiques du système énergétique. Le prix doit exprimer rareté, qualité et coûts techniques d'une énergie considérée . Les modes d'appropriation des ressources sont un élément important de ce sous-système.

(1) J-C DEBEIR, J-P DELEAGE, D. HEMERY, *Les servitudes de la puissance*, Flammarion, 1986, p.24.

(2) J-M CHEVALIER, P. BARBET, L. BENZONI, *Economie de l'énergie*, Dalloz, 1986, p.115.

Ces définitions nous montrent que l'on peut approcher le système énergétique différemment selon que telle ou telle composante est retenue. Notre propos n'est pas ici de révéler la pertinence de l'ensemble des composantes du système énergétique dans son évolution historique mais de privilégier délibérément l'une d'entre elles. Nous avons donc choisi de retenir les techniques comme l'une des composantes explicatives de son évolution dans le temps.

Cela nous semble être d'un certain pouvoir explicatif du point de vue historique : les changements qui se sont opérés au sein du système technique ont été au coeur de l'évolution des civilisations. B. GILLE (1) a montré combien le fait économique et le fait technique sont interdépendants de façon très étroite dans l'histoire des sociétés humaines.

Nous pensons et allons montrer dans le paragraphe suivant que de la même manière, il existe une interdépendance entre la succession des systèmes énergétiques et l'évolution du système technique au sens de B. GILLE. Le système technique est un concept qui traduit l'idée que les savoirs et les procédés utilisés dans une civilisation à un moment donné représentent un tout cohérent. Il le définit comme "une cohérence entre les techniques qui sont en fait toutes dépendantes les unes des autres, ce qui implique un niveau commun à peu près constant de la progression de chacune d'entre elles".

Le développement d'une ressource énergétique n'est donc pas étranger au système technique qui prévaut à un moment donné ; même, nous en sommes conscients, si son développement n'est en relation qu'avec quelques éléments du système technique et non l'ensemble des éléments qui le compose.

Les techniques, support nécessaire à la transformation des ressources énergétiques, constituent un élément clé de leur histoire et de leur devenir.

(1) B. GILLE, *L'histoire des techniques*, La pléiade, p.1607.

**TECHNIQUES D'UTILISATION DES RESSOURCES NATURELLES
DANS LE DOMAINE ENERGETIQUE**

ENERGIE	AMENAGEMENT DE L'ESPACE
<p>III^e s. av J-C- Moulin à eau</p> <p>VII^e après JC - Moulin à vent sur plateaux iraniens</p> <p>X^e s. - Expansion du moulin à vent dans la région de Tarragone</p> <p>XI^e s. - Moulin à marée au port de Douvres</p> <p>XII^e s. - Expansion du moulin à eau</p> <ul style="list-style-type: none"> - Développement de l'industrie minière en Europe - Premiers moulins à vent en Normandie <p>1600 - Ranéfaction du bois en Europe</p> <p>1650-1700 - Nombreuses machines :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Première machine à combustion interne de Huyghens - Première machine de production continue de l'électricité statique par Otto de Guericke - Machine à vapeur de D. Papin à Cassel - Machine à vapeur de Savery - Machine atmosphérique de Papin <p>1712 - Machine atmosphérique de Newcomer</p> <p>1735 - Expansion de la fonte en coke</p> <p>1769 - Premiers brevets de watt pour la machine à vapeur</p>	<p>1736 - Navire à vapeur de J. Hulls</p> <p>1776 - Premiers chemins de fer pour le transport du charbon de la mine au canal</p> <p>1785 - Première voie ferrée en France au Creuzot</p>

ENERGIE	AMENAGEMENT DE L'ESPACE
1791 - Turbine à gaz de Barber	
1792 - Gaz d'éclairage par Murdoch	1797 - Locomotive à vapeur sur route de Trevithick
	1814 - Première locomotive à vapeur de G. Stephenson
1824 - Réflexions sur la puissance du feu par S. Carnot	
1828 - Principe du moteur électrique fondé sur l'induction de Faraday	
1859 - Premier puits de pétrole aux USA à Titusville foré par Drake	1829 - Eclairage public au gaz dans la rue de la Paix
1860 - Moteur à explosion de Lenoir - Moteur à 2 temps-Brevet Hugon	
1862 - Moteur à 4 cylindres d'Otto	
1880 - Premières tentatives de forage de puits de pétrole en mer à partir de la côte californienne	1880 - Train électrique d'Edison à Menlo Park
1884 - Gaulard met au point un transformateur et crée à Bellegarde la 1ère centrale électrique	
- Turbine hydraulique Pelton	
- Turbine à vapeur de Ch. Parsons	
- Développement du charbon	
1893 - R. Diesel met au point son premier moteur	1887 - Locomotive électrique au métro de Londres
1919-23 - Etudes de projet d'usine marémotrice en Angleterre	1887-90- Premières voitures automobiles Peugeot
1925 - Développement du pétrole	1893 - Construction d'un planeur par Lilienthal
	1903 - Premier décollage du biplan des frères Wright
	1908 - Blériot traverse la Manche
	1924 - Diesel électrique
	1930 - Premières locomotives diesel électrique aux USA
	- Début de l'Aéropostale
	1931 - Premières "michelines"
	1934 - Mise au point chez Citroën de la traction avant
1937 - Utilisation du méthane naturel comme source d'énergie	automobile

ENERGIE	AMENAGEMENT DE L'ESPACE
1942 - Première pile atomique de Fermi aux USA	1938 - Vol expérimental d'un avion à réaction en Allemagne
1947 - Première plate-forme pour le forage de puits de pétrole sous-marin (off-shore)	1947 - Traversée de l'Atlantique par un avion américain en pilotage automatique.
1955 - Construction du four solaire d'Odeillo	- Franchissement du mur du son par Yeager
1956 - Production d'électricité nucléaire à Marcoule	1953 - Bombe thermonucléaire
1965 - Premier réacteur nucléaire	1967 - Premiers essais de Concorde
1966 - Mise en service de l'usine marémotrice de la Rance	1969 - Armstrong et Aldrin sur la Lune
1973 - Centrale surgénératrice Phénix à Marcoule	1975 - Premiers vols réguliers de Concorde
	1976 - Atterrissage d'un module sur Mars.

Sources : B. GILLE, L'histoire des techniques, Gallimard, 1978.

PH BOURRELIER, R. DIETRICH, Le mobile et la planète ou l'enjeu des ressources naturelles, Economica, 1989.

§ 2 - Une mise en perspective historique

Les évènements passés nous apprennent que la structure du système énergétique a considérablement changé au cours du temps : elle relève une succession de systèmes énergétiques associés à des stades particuliers de l'évolution humaine.

La capacité des sociétés à évoluer passe nécessairement par leur aptitude à capter ou prélever l'énergie naturelle sous ses formes brutes (flux continu d'énergie issu du rayonnement solaire, énergie contenue dans les stocks de ressources) afin de la rendre utilisable par l'homme (force motrice, chaleur, éclairage...). Il s'agit dès lors d'un long processus d'apprentissage qui doit conduire l'humanité à la domestication énergétique. Cette voie est inéluctable pour assurer son développement dont la finalité est de procurer un bien-être, un bonheur suprême aux sociétés humaines.

Nous allons donc montrer quelles sont les caractéristiques essentielles de l'évolution du système énergétique avec en toile de fonds une grille d'analyse particulière : l'histoire des techniques.

Les premières sources d'énergie utilisées dans les sociétés humaines furent les sources d'énergie renouvelables avec notamment la biomasse, l'eau et le vent.

Le bois a été utilisé pour la production d'énergie thermique pendant des millénaires. Dans les sociétés primitives où sont pratiquées chasse, cueillette et pêche, l'homme utilise les seuls convertisseurs offerts par la nature : les plantes, les animaux et les hommes. La combustion de produits forestiers et agricoles va perdurer longtemps encore.

L'utilisation de l'énergie motrice des animaux en complément de celle de l'homme permet un accroissement des rendements agricoles. Les progrès relatifs à l'amélioration des outils, à la sélection des plantes ou encore aux meilleures techniques d'irrigation vont en retour augmenter le volume d'énergie motrice humaine et animale disponible.

L'énergie hydraulique fut très tôt utilisée grâce à une invention majeure qui constitue l'évènement technique primordial de l'Antiquité : c'est l'invention du moulin à eau (3^e s. avant JC). En effet, il permet pour la première fois de capter en un point fixe une énergie mécanique autre que biologique. Cependant, il a fallu attendre le 12^e siècle pour assister à une véritable diffusion de cette invention. Cette mutation concerna l'Europe du Nord et de l'Ouest et permit de démultiplier la force humaine à grande échelle.

L'utilisation de l'énergie éolienne eut lieu pour la première fois il y a 5 000 ans avec les embarcations sur le Nil.

Elle était alors source de force motrice mobile exclusivement avec des voiles comme convertisseur. Son utilisation comme source de force motrice fixe sera possible grâce à l'invention du moulin à vent au 7^e siècle après JC. Pendant des siècles, l'énergie éolienne constituera une des principales sources de force motrice mobile et fixe. Avec le développement du bateau à voile, elle connut un renouveau et fut à l'origine de la période des "grandes découvertes" et du grand commerce maritime. Elle permit le développement de centres maritimes à partir du 15^e siècle et l'exploitation à l'échelle mondiale des ressources de l'échange et du travail inégaux.

On peut ajouter à ces différentes sources d'énergie renouvelables, l'énergie des marées. Elle est très ancienne. Les premiers moulins de marée sont cités au 11^e siècle.

Malgré ces quelques innovations majeures, les sociétés restent largement dépendantes des ressources biologiques pour leurs besoins énergétiques.

Le développement des sociétés pré-industrielles s'est largement appuyé sur l'utilisation du bois, du vent, de l'eau et de la traction animale. Au milieu du 15^e siècle, le bois et les énergies humaines et animales représentaient plus de 80% de la consommation d'énergie des pays actuellement développés (1). Le basculement va s'opérer avec la Révolution Industrielle. La Révolution Industrielle marque une rupture radicale avec les systèmes énergétiques antérieurs. Avec elle, le développement intensif de l'utilisation du charbon s'opère et ouvre la voie d'un nouveau système énergétique où les combustibles fossiles deviennent prépondérants. Conjointement, elle va marginaliser les ressources énergétiques renouvelables (bois, vent notamment). Le primat des énergies fossiles l'emporte sur celui des énergies renouvelables.

Dès la fin du 16^e siècle, une pénurie importante de bois sévit en Angleterre. Afin d'y faire face, le charbon apparaît alors comme le parfait substitut pour remplacer le combustible végétal et satisfaire aux besoins thermiques (chauffage, production thermique industrielle). C'est au 18^e siècle que l'Europe toute entière va être affectée d'une pénurie croissante de bois. Elle sera enrayée par le développement de la production de charbon.

La sidérurgie évoluera et aura recours non plus au bois ou à l'eau pour le combustible et pour la force motrice mais au charbon.

(1) P. BAIROCH, "Energie et Révolution Industrielle : nouvelles perspectives", *Revue de l'énergie*, numéro spécial, Energie et développement, n°356, août-septembre 1983, p. 399-407.

Le perfectionnement de l'utilisation de l'énergie hydraulique se poursuit au 18^e siècle mais est concurrencé par la mise au point puis l'amélioration de la machine à vapeur.

L'invention de la machine à vapeur -1769- construite par J. WATT, associé à l'industriel BOULTON constitue une prouesse technique. Pour la première fois, l'énergie thermique peut être convertie en énergie mécanique -travail- alors que les sociétés antérieures devaient recourir à des convertisseurs biologiques.

On assiste à la première étape dans l'avènement d'un nouveau système énergétique. Elle se caractérise par le développement de la production de charbon avec l'accroissement des besoins. Le charbon permet de satisfaire les besoins croissants en force motrice, chaleur domestique et industrielle ainsi qu'en source de lumière. Son développement est rendu possible grâce à l'utilisation de la machine à vapeur, grosse consommatrice d'énergie. La machine à vapeur est utilisée dans les mines pour le pompage de l'eau ; elle joue donc un rôle dans l'extraction du charbon. De plus, elle est utilisée dans de nombreuses industries (textiles, sidérurgie).

La seconde étape concerne la deuxième moitié du 19^e siècle. L'industrialisation induit une demande croissante d'énergie que le charbon peut satisfaire : l'offre d'énergie semble illimitée (1). Les développements conjoints du réseau de chemin de fer et du transport maritime à vapeur peuvent se réaliser grâce à une offre croissante de charbon. Parallèlement, l'emploi des aciers spéciaux dans la fabrication de la machine à vapeur permet l'obtention de meilleurs rendements.

C'est durant cette seconde période que de nouveaux convertisseurs sont inventés. Citons les plus importants d'entre eux : moteur à explosion, moteur électrique, turbine à vapeur et turbo-compresseur. Leur apport majeur est de mettre à la disposition des techniques, une énergie transportable et d'accroître la production d'énergie. Après la découverte du gaz d'éclairage à la fin du 18^e siècle, le pétrole et l'électricité s'imposent comme moyen d'éclairage ainsi que dans les secteurs de production. Le moteur électrique est couplé à l'outil de production. L'électricité intervient aussi dans la production des matériaux (aluminium par électrolyse).

Du côté des transports, des changements importants ont lieu : modernisation des chemins de fer (matériel de traction, signalisation électrique), développement des transports terrestres et débuts de l'aviation grâce au moteur à explosion.

(1) L'exemple de la transformation de la fonte en acier avec le procédé Bessemer est une composante majeure du processus d'industrialisation.

Depuis les débuts de la Révolution Industrielle en Europe, de nombreuses modifications ont affecté le système énergétique : les deux étapes présentées révèlent comment les sources d'énergie fossiles ont pris le pas sur les sources d'énergie renouvelables. Seule l'énergie hydraulique a survécu à la Révolution Industrielle (satisfaction des besoins en électricité). Le charbon, le pétrole et l'électricité d'origine hydraulique l'ont accompagnée.

Le système énergétique issu de l'industrialisation des sociétés en Europe est caractérisé par une diversification des combustibles fossiles et par leur position dominante. L'électrification et l'ère du pétrole vont se poursuivre au 20^e siècle. Le charbon va cependant amorcer un lent déclin dès la fin du 19^e siècle : les améliorations techniques d'exploitation arrivent à saturation. Il s'agissait de limites technologiques. Le pétrole va supplanter le charbon dans de nombreux usages. Dans les centrales thermiques, le combustible utilisé dans les années 1950 était le charbon. Mais au début des années 1960, avec la baisse du prix du fioul, le charbon est remplacé par le fioul lourd. Avec le moteur diesel et ses améliorations et l'exploitation du pétrole, les locomotives à vapeur utilisant le charbon sont remplacées par des locomotives diesel.

Ainsi, tandis que la production mondiale de pétrole double de 1950 à 1960 (de $524,8 \cdot 10^6$ tonnes à $1051 \cdot 10^6$ tonnes) la production de charbon progresse plus lentement (de $1580 \cdot 10^6$ tonnes à $1971 \cdot 10^6$ tonnes) (1).

A partir du milieu des années 1950, la concurrence pétrole/charbon fait du pétrole une énergie royale. Une nouvelle technique d'exploitation et de forage (l'off-shore) et des progrès continus vont permettre d'extraire toujours plus profond le pétrole contenu dans les roches. La découverte de nouveaux gisements et le perfectionnement du principe de la combustion interne permettent le développement de l'automobile. Le marché pétrolier connaît un véritable essor dans les années 1960. Le gaz naturel va se développer après le pétrole. En 1940, il ne recouvre que 6% de la demande d'énergie primaire.

Dans les années 1970, une nouvelle source d'énergie apparaît : l'énergie nucléaire. L'énergie hydraulique va être directement concurrencée. La production d'électricité à partir de combustibles fossiles va annoncer sa décroissance. Sur le plan technique, il existe 3 filières nucléaires (2) : les centrales à uranium naturel, celles à uranium enrichi et les centrales surrégénératrices. Malgré les quantités colossales d'énergie qu'elles peuvent produire, nous nous refusons de les considérer comme des "convertisseurs surpuissants". L'énergie nucléaire n'est pas une énergie renouvelable car elle tire sa force d'un minéral -l'uranium- qui par essence

(1) J-M CHEVALIER, P. BARBET, L. BENZONI, *Economie de l'énergie*, Dalloz, 1986, p.68.

(2) L. PUISEUX, P. RADANNE, *L'énergie dans l'économie*, 1989, Syros, p.67.

n'est pas infini.

Le 20^è siècle peut se résumer ainsi : sur la lancée du développement des ressources énergétiques fossiles au 19^è siècle, le système énergétique est prisonnier, victime d'un profond déséquilibre structurel. Les besoins croissants ont été satisfaits par des ressources fossiles de manière quasi-exclusive.

L'analyse du système énergétique dans le temps montre combien il est tributaire de la technique.

Au début de l'évolution des sociétés, les techniques sont rudimentaires et l'homme a recours à des convertisseurs simples (plantes, force humaine et animale). Au fur et à mesure que les sociétés se développent, se complexifient, les relations entre les techniques et le savoir scientifique deviennent plus étroites. La maîtrise -au sens où l'on domestique l'énergie- de l'énergie passe non seulement par une technique mais par une cascade de découvertes relatives aux différentes connaissances scientifiques. L'invention du feu a suffi pour satisfaire les besoins thermiques à partir du bois. L'apparition de la machine à vapeur ne pouvait se faire sans un certain nombre de découvertes scientifiques qui s'échelonnent dans la première moitié du 17^è siècle, puis complétées au 18^è siècle (pression atmosphérique, expérience des hémisphères de Magdebourg, phénomène de condensation, de chaleur latente).

Un niveau général de connaissances scientifiques est un préalable de l'invention (1). Un développement scientifique suffisant est une condition nécessaire à la naissance d'une invention.

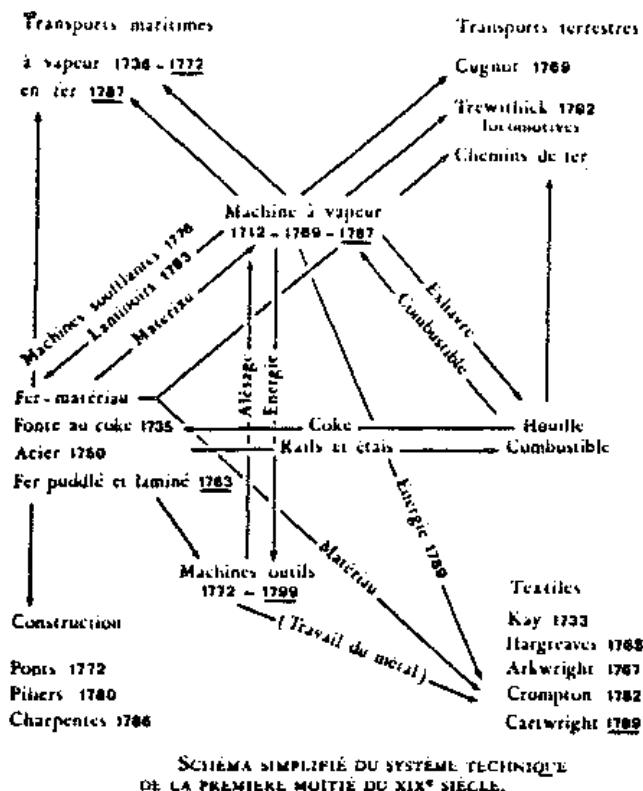
On assiste à un processus de complexification dans la transformation de l'énergie primaire. Cela va s'exprimer à travers une combinaison particulière entre le système technique et le système énergétique. Un système technique se compose selon B. GILLE de l'"ensemble de cohérence aux différents niveaux de toutes les structures de tous les ensembles -techniques- et de toutes les filières" (2). La notion d'ensemble technique exprime le fait qu'une technique complexe nécessite non pas une technique unitaire mais des techniques affluentes dont l'ensemble, la combinaison, concourt à un acte technique particulier. Chacune des composantes d'un ensemble technique a besoin pour son fonctionnement propre d'un certain nombre de produits de l'ensemble. La sidérurgie utilise la machine à vapeur mais celle-ci aura besoin d'un métal de plus en plus résistant pour supporter les hautes températures (aciers spé-

(1) B. GILLE, *L'histoire des techniques*, Gallimard, 1978, p.37.

(2) B. GILLE, opus cité, p.19. Il définit la filière comme une suite d'ensembles destinés à fournir le produit souhaité.

ciaux).

Le système technique de la première moitié du 19^e siècle met en évidence des liaisons internes nombreuses ; le "coeur" du système est constitué de la machine à vapeur.



Source : B. Gille, L'histoire des techniques, p.20, figure 4.

Pour B. GILLE, l'histoire du 19^e siècle est ponctuée par la succession de trois systèmes techniques au cours desquels une source d'énergie a prévalu : le système classique fondé sur l'énergie hydraulique et l'usage du bois, le système moderne fondé sur l'usage de l'énergie minérale de la machine à vapeur, le chemin de fer et le charbon, le système contemporain fondé sur l'électricité, le moteur à explosion et la chimie organique.

Les révolutions techniques successives résultent de l'interdépendance des techniques. L'hégémonie des ressources fossiles a résulté d'une combinaison originale entre différents ensembles techniques. A priori, on ne pouvait penser que le charbon, puis le pétrole, le gaz allaient accompagner les développements industriels des sociétés. C'est grâce aux diverses techniques mises au point puis améliorées que leur exploitation débuta et s'intensifia avec l'essor du machinisme.

A la fin du 18^e siècle, la situation de la sidérurgie anglaise était critique du fait du manque de bois. Sans la découverte de la fonte au coke (1735), elle était vouée à une asphyxie quasi-to-

tale.

Il aurait pu en être de même pour le charbon aux 19^e et 20^e siècles si de nouvelles sources d'énergie (pétrole, gaz) énergie hydraulique, électricité, nucléaire) n'avaient pas été découvertes à conditions de disposer des convertisseurs adéquats. Il existe donc des limites technologiques qui sont des contraintes au développement des ressources énergétiques.

L'étude du système énergétique que nous avons menée porte sur une longue période ce qui permet de dégager une vue d'ensemble de l'utilisation des ressources énergétiques.

Il peut apparaître intéressant d'examiner plus en profondeur dans quelle mesure l'évolution observée est en relation avec une succession de cycles particulière : une succession de longs cycles.

Section 2 - Le sens de l'évolution historique

§.1 - Les tendances à long terme

L'évolution du système énergétique et des techniques nécessaires à la conversion de l'énergie brute ne semble pas étrangère à celle des longs cycles de l'activité économique. En effet, l'énergie joue un rôle essentiel dans les longs cycles. Nous nous référons ici aux cycles de KONDRATIEV.

Ces longs cycles tels qu'ils sont étudiés par N. D. KONDRATIEV (1) se présentent depuis 1800 jusqu'à la première guerre mondiale de la manière suivante. La caractéristique des cycles est la répétition du cycle environ tous les cinquante ans.

Période de progression	Creux	Pic	d'un creux à l'autre	Nombre d'années		
				d'un pic à l'autre	d'un creux à un pic	d'un pic à un creux
1790-1813	1790	1813			23	
1844-1874	1844	1874	54	61	30	31
1895-1914-1916	1895	1916	51	42	21	21

Notre propos n'est pas d'expliquer ces cycles ici. Nous les rappelons pour mémoire. A partir de là, nous allons montrer comment l'évolution des sources d'énergie est en relation avec les cycles de KONDRATIEV.

Il semble intéressant de rappeler la thèse soutenue par J.A. SCHUMPETER (2) qui a porté une attention particulière au concept du cycle. Il considère que la phase d'expansion du long cycle est toujours générée par une innovation majeure qui constitue la force motrice durant un temps considérable. Cette innovation exerce une influence sur quelques, voire l'ensemble des secteurs de l'économie.

La période d'expansion du premier cycle de KONDRATIEV est associée à la diffusion de la va

(1) N.D. KONDRATIEV, "The long waves in economic life", *Review of economics and statistics*, nov.1935.

(2) J.A. SCHUMPETER, *Business cycles : a theoretical, historical and statistical analysis of the capitalist process*, 1939.

peur en tant qu'énergie. Sa force motrice était la machine à vapeur. Une forme plutôt primitive de celle-ci fut introduite par SAVERY (1698) avec pour objectif le pompage de l'eau au fond des mines de charbon. En 1712, NEWCOMEN l'améliora mais il fallut attendre les développements ultérieurs de WATT (1769) pour assister à des améliorations majeures (condensateur séparé 1769 et moteur rotatif 1781).

Si l'on accepte sa proposition, alors les relations entre la vapeur, source d'énergie et les ressources énergétiques sont évidentes. Dans un premier temps, l'innovation majeure de la période d'expansion que constitue la machine à vapeur a été développée dans le but de favoriser la production de charbon qui allait devenir le combustible principal. En second lieu, il s'avérait que la machine à vapeur avait besoin d'un combustible et que le charbon était le seul combustible disponible en quantités croissantes.

La condition de la diffusion de la machine à vapeur était donc la disponibilité du charbon. Le processus circulaire est simple : l'innovation, la machine à vapeur, permet d'augmenter la production de charbon et sa diffusion -dans l'industrie du fer et de l'acier notamment- génère rapidement une demande croissante pour ce même combustible.

La seconde période d'expansion (1844-74) est associée à la percée du chemin de fer. Deux conditions essentielles étaient réunies pour permettre une rapide diffusion de cette innovation révolutionnaire dans les moyens de transport : une offre abondante de travail et de matériaux (fer et acier surtout) pour la construction des chemins de fer et un combustible abondant (le charbon).

Du début à la fin de cette période du cycle, le facteur d'accroissement de la fonte brute est de 6 au Royaume Uni, de 5 en France et plus encore en Allemagne. Le travail du fer, la fabrication de l'acier et les chemins de fer eux-mêmes nécessitent de la même manière des quantités croissantes de charbon.

La phase d'expansion du troisième cycle de KONDRATIEV (1895-1914-1916) est selon SCHUMPETER due aux effets conjugués de l'électricité et de l'automobile. En 1913, le nombre de véhicules automobiles est d'environ 500 000 dans l'ensemble de l'Europe, une partie est fabriquée en Europe seulement, le reste est importé des USA. Cependant, alors que l'automobile a contribué probablement à l'apparition de la phase d'expansion, il est peu probable qu'elle ait été une force motrice d'une importance majeure en Europe. La part de l'électricité dans les rapides progrès de l'activité économique est plus significative. Hormis le fait d'offrir une nouvelle énergie, la production d'électricité nécessitait des quantités d'énergie importantes supplémentaires. En Europe, c'est le charbon encore une fois qui va être utilisé.

La diffusion de l'automobile demandait aussi la disponibilité d'un combustible en quantité suffisante : il ne s'agit plus ici du charbon mais d'un produit issu du raffinage pétrolier.

L'étude des longs cycles révèle une étroite corrélation entre les phases d'expansion des cycles et l'évolution du système énergétique analysé à travers sa composante technique. Les innovations majeures qui ont déclenché la phase d'expansion dans les cycles de KONDRATIEFF sont toutes en rapport avec le système énergétique.

Dans le cas de la machine à vapeur et des chemins de fer, l'innovation provient de la production d'énergie ou bien est en rapport très étroit avec elle. Dans le cas de l'électricité, l'innovation permet de produire une nouvelle forme d'énergie. L'ensemble de ces innovations avait pour objectif d'utiliser l'énergie primaire sous une forme nouvelle. Elles ont permis de répondre à l'accroissement de la demande d'énergie. Enfin, leur diffusion était contrainte par la disponibilité des ressources énergétiques : l'offre abondante et la grande disponibilité de combustibles était la condition fondamentale d'une diffusion dans tous les secteurs de l'économie.

On peut même aller plus loin et considérer non plus l'innovation comme la seule force motrice de la phase d'expansion mais aussi la disponibilité en ressources énergétiques : c'est une combinaison adéquate à un moment donné entre le système énergétique et le système technique qui déclenche la phase d'expansion du long cycle.

Si on accepte que le second cycle de KONDRATIEV peut être attribué au boom du chemin de fer, on suppose que le charbon qui était nécessaire pour la fabrication des rails et l'alimentation en carburant des trains était disponible. On considère aussi que les chemins de fer, en retour, ont rendu possible le développement du charbon en lui fournissant un moyen idéal pour le transport. Des relations similaires entre chacune des grandes innovations et les ressources énergétiques peuvent être établies et vérifiées.

Partant de la position de SCHUMPETER, d'autres études ont été menées pour tenter d'éclairer la relation entre les cycles longs et l'énergie.

G. F. RAY (1) essaie tout d'abord de caractériser le cycle de KONDRATIEV qui a suivi la première guerre mondiale. Il considère que le creux relatif aux années 30 correspond à la seconde guerre mondiale et que la forte phase d'expansion a démarré tôt après la guerre et de manière ininterrompue jusqu'en 1973, point tournant du cycle.

(1) G.F. RAY, "Energy and the long cycles", *Energy economics*, January 1983, p.3-8.

Ce cycle dont la période d'expansion s'étend de 1946 à 1973 est calculé arbitrairement par l'auteur qui partage la thèse de KONDRATIEV (durée de 50 ans de cycle).

Phase d'expansion	Creux	Pic	d'un creux à l'autre	Nombre d'années		
				d'un pic à l'autre	d'un creux à un pic	d'un pic à un creux
1946-1973	1946	1973	51	57	27	30

Si on laisse de côté la turbulence des années 1930 -période qui inclut la deuxième guerre mondiale, une phase d'expansion est amorcée dans les années 1950 (décennies d'après-guerre). Il n'est pas possible d'expliquer les raisons de cette période avec la simplicité de SCHUMPETER.

La reconstruction de l'après-guerre peut l'avoir déclenchée. L'automobile également a du jouer un rôle mais aussi l'expansion du commerce mondial (notamment les navires pétroliers) et l'essor rapide du transport aérien. Leur développement était basé sur la ressource "pétrole" tout comme la nouvelle branche de l'industrie chimique : la pétrochimie.

Dans les pays développés, la rapide croissance économique a élevé le revenu réel de la population, créant une demande croissante dans les appareils domestiques. Leur utilisation était basée sur disponibilité de l'énergie électrique. Cette phase d'expansion a généré une forte demande pour les produits agricoles et les industries d'extraction.

L'offre provient de deux sources. D'une source traditionnelle : l'agriculture moderne et l'exploitation minière vont atteindre des niveaux plus performants grâce à la technologie moderne et à l'introduction de nouvelles formes d'énergie dans des variétés anciennes et nouvelles (fertilisants). L'autre source est le remplacement de matériaux traditionnels par de nouveaux faits par l'homme qui sont basés sur le pétrole, le gaz et le charbon. Ils nécessitent de plus des quantités importantes de combustible.

Dans un second temps, il s'interroge sur le prochain cycle. Considérant que nous sommes dans une période de faible activité économique, une phase d'expansion va donc lui succéder. La question est de savoir quelle innovation majeure va déclencher la phase expansionniste.

Fort de l'hypothèse qui précise l'existence de relations entre les innovations majeures et l'énergie, la phase d'expansion sera probablement déclenchée par un développement important qui prendra source dans le système énergétique ou sera très près de lui.

L'état présent du marché énergétique et la place qu'y occupe le pétrole ne doit pas induire en erreur quant à l'avenir. Il pourrait rapidement changer du fait d'évènements politiques ou pour beaucoup d'autres raisons (raréfaction de la ressource au 21^e siècle).

Afin de diversifier les offres de ressources et de réduire la dépendance à l'égard du pétrole, la plupart des pays développés ont encouragé la production d'énergie domestique ainsi que l'amélioration de l'efficacité de l'usage énergétique. Les efforts de recherche sur les procédés et sur les produits permettant un meilleur usage des ressources énergétiques devraient se poursuivre dans les 15 prochaines années.

Il y a une vingtaine d'années, quand l'énergie était bon marché, des scientifiques pensaient que le nucléaire serait la source d'énergie du 21^e siècle. Cependant, compte tenu de l'opposition de la population civile, de la crise des débouchés ou encore de l'augmentation du coût du kwh, l'énergie nucléaire ne devrait avoir qu'une place limitée sur le marché énergétique futur. Le charbon aura une place aussi certainement plus importante qu'aujourd'hui. Néanmoins, ni l'énergie nucléaire, ni le charbon n'apporteront la solution satisfaisante dès lors que lentement les ressources en pétrole se tarieront. Pour RAY, ces deux sources d'énergie constituent une solution partielle. Il existe un vide sur la scène énergétique du premier quart de siècle prochain. On oublie de prendre en compte l'énergie solaire, l'énergie éolienne, l'énergie des vagues ou des marées, l'utilisation de la biomasse ou toute autre forme d'utilisation des ressources renouvelables.

Il propose de définir une solution dans laquelle 10 à 20% des besoins énergétiques des principaux pays consommateurs pourraient être satisfaits par l'utilisation d'une ou plusieurs sources d'énergie renouvelables ; ce pourcentage serait de 5% à l'échelle mondiale. Il envisage ainsi un nouveau cycle qui débute en 1990-95 avec l'apparition d'innovations majeures relatives à l'utilisation de nouvelles sources d'énergie. Du pic de 1973 au creux de 1990-95, un intervalle de 17-22 années se sera écoulé.

Les relations étroites entre l'évolution du système technique et le système énergétique d'une part et l'activité économique d'autre part s'inscrivent dans le long terme.

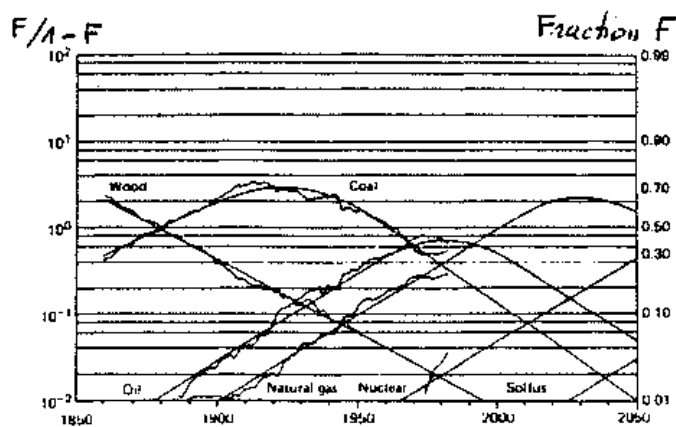
Si on accepte l'évolution cyclique de l'activité économique, on ne peut pas considérer celle des ressources énergétiques comme autonome, qui aurait sa propre histoire. L'évolution à travers le temps du système technique inscrit au système énergétique une direction particulière qui va dans un second temps "tirer" l'activité économique et déclencher un nouveau cycle.

Une autre étude basée sur l'hypothèse des longs cycles a été réalisée par C. MARCHETTI (1) afin d'étudier les phénomènes de substitution qui ont affecté le système énergétique depuis 1850. Au moyen d'un modèle développé à l'International Institut for Applied Systems Analysis - IIASA-, le modèle de substitution logistique, il analyse la substitution globale de l'énergie primaire de 1850 à 2050 à l'aide d'un indicateur particulier : $F/(1-F)$

F représente la part de marché des différentes ressources énergétiques retenues -bois, charbon, gaz naturel, énergie nucléaire, solaire + fusion nucléaire. C'est une fraction du marché total. $F/(1-F)$ est le ratio qui représente le processus de substitution entre les énergies primaires sur une échelle semi-logarithmique. Ce ratio exprime donc la part du marché d'une ressource énergétique donnée rapportée à la part détenue par les autres ressources.

La substitution des différentes sources d'énergie primaire apparaît comme un processus régulier.

Substitution des différentes sources d'énergie primaire



soifus = solaire + fusion nucléaire

Les pentes des segments linéaires du processus de substitution (courbes logistiques) sont à peu près les mêmes, indiquant que l'ensemble des 4 plus anciennes sources d'énergie suivent la même phase de croissance dans le temps dont la durée est de 100 ans environ. En outre, les parts de marché ne reflètent pas les importants événements historiques que sont les deux guer-

(1) C. MARCHETTI, "Recession 1983 : ten more years to go ?", Technological forecasting and social change", 24, 1983, p.331-342. Ses travaux sont d'ailleurs confirmés par une étude réalisée par la Commission des Communautés Européennes dans le cadre de l'Europe des 9. Voir J. PERCEBOIS, *Economie de l'énergie*, Economica, 1989, p.155.

res mondiales : les tendances de long terme sont remarquablement stables. Par ailleurs, les phases de saturation sont atteintes pour chacune des sources d'énergie bien avant que leur part de marché n'atteigne 90%. Le charbon a saturé pendant les années 20 et le pétrole pendant les années 60. Le gaz naturel devrait saturer dans les années 2020.

L'évolution du système énergétique est étroitement corrélée avec les changements technologiques qui se sont opérés. Les substitutions énergétiques sont apparues avec de tels changements et de ce fait sont plus des substitutions technologiques qu'énergétiques.

Les substitutions ont été relativement indépendantes des raretés relatives des différentes sources d'énergie : le charbon ne manquait pas quand le pétrole l'a remplacé dans de nombreux usages. La raison de l'accroissement de la part de marché du pétrole est que ses qualités sont supérieures à celle du charbon et qu'il s'adaptait mieux aux besoins.

En appliquant le modèle à l'étude du changement technique, MARCHETTI trouve un résultat intéressant : "...The time for a basic innovation to go from 10% à 90% of the available market is usually 50 years" (1). La substitution d'un système technique à un autre est donc lente ; hypothèse de "pulsations semi-séculaires". Et par ailleurs, elle est deux fois moins lente que celle qui concerne les sources d'énergie au sein du système énergétique (environ une centaine d'années).

Le passage d'un système énergétique à un autre et avec lui l'hégémonie d'une source d'énergie sur d'autres est un processus séculaire dont la régularité cyclique est parfaite. L'analyse de l'évolution cyclique des sources d'énergie traduit la lenteur de la substitution d'une forme d'énergie à une autre. C'est en réalité l'expression de l'abandon d'un système technique à l'acceptation d'un nouveau.

L'idée que les innovations jouent un rôle primordial à l'égard des substitutions énergétiques qui s'expriment dans l'évolution du système énergétique est partagée dans l'approche de long terme de PIATIER (2) sur l'évolution de sociétés industrielles. Il définit un concept central, celui de révolution industrielle : "when several major innovations appear simultaneously, their combination is an industrial revolution" (3).

Trois révolutions industrielles sont considérées depuis 1850 à nos jours. La révolution industrielle du 19^e siècle est basée sur la production de charbon, l'acier et l'usage de la vapeur en tant qu'énergie. Cela conduit à la mécanisation du secteur textile, à l'expansion de la chimie et à l'ap

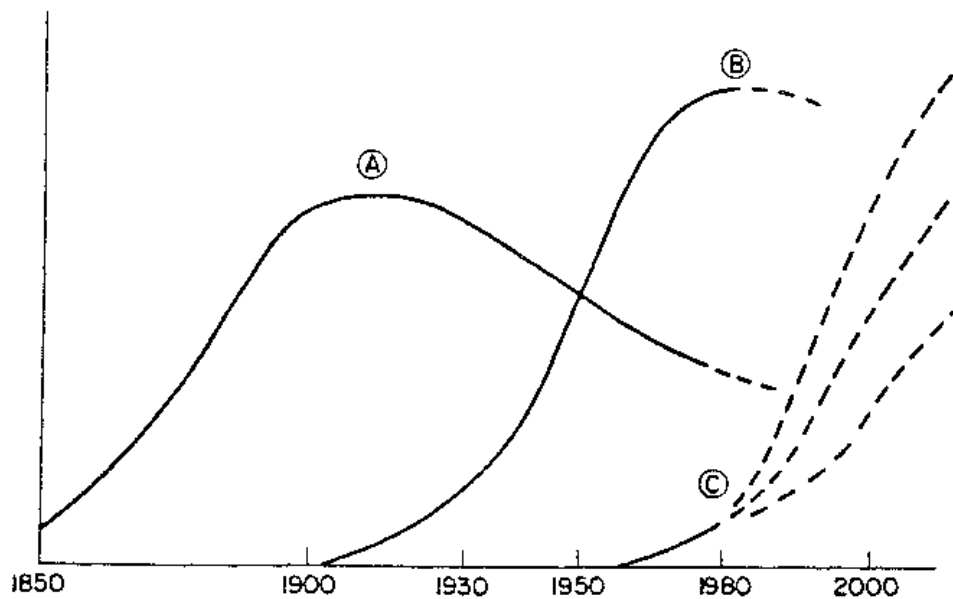
(1) C. MARCHETTI, opus cité.

(2) A. PIATIER, "Innovation, information and long-term growth", *Future*, octobre 1981, p.371-382.

(3) A. PIATIER, opus cité, p.373.

parition des chemins de fer. La révolution industrielle qui succède s'appuie sur les combustibles fossiles liquides, l'automobile, l'aviation, la chimie organique, l'électricité et a débuté au début du 20^è siècle. La troisième est celle de la fin du 20^è siècle. Elle est basée sur la mise en valeur des nouvelles sources d'énergie -nucléaire, biomasse, solaire...- ainsi que l'électronique, les télécommunications, etc...

Une révolution industrielle suit un trend séculaire et peut être représentée par une courbe logistiqu caractérisée par 4 stades particuliers : une faible croissance, une croissance rapide, un ralentissement de la croissance, une phase de maturité avec une croissance nulle. Le charbon, l'acier, les chemins de fer se sont développés ensemble aux côtés des textiles et la chimie. La fin d'une première vague d'innovations est apparue avec la crise des années 30.



The three industrial revolutions.

Key:

- (A) Coal, steel, rail, textiles, chemistry.
- (B) Oil, cars, steel (sheet), mechanical industry, air transport, organic chemistry, electricity.
- (C) New energy sources (including nuclear), oceanic development, biomass, genetic engineering, electronics, telematics, automation, etc.

Le passage de la première révolution industrielle à la seconde s'est effectué en un siècle. La seconde révolution arrive en phase de maturité dans les années 1970 et amorce une décroissance avec la crise pétrolière de 1973-74 qui va être le catalyseur d'un ralentissement de la croissance économique. La troisième révolution est en phase de faible croissance et il y a incertitude quant à la vitesse avec laquelle elle va accéder à la phase de forte décroissance. Les années 1980 sont considérées comme une phase de transition. C'est une période marquée par la maturité - puis le déclin- des principales industries de la dernière révolution industrielle et par la faible crois

sance de nouvelles activités de la révolution qui commence et qui est seulement au stade embryonnaire.

A ces deux mouvements de long terme qui se superposent, il faut ajouter les variations cycliques des deux crises conjoncturelles de 1974 et 1979 et les variations accidentelles (crise pétrolière) pour apprécier toute la dimension de cette période transitoire caractérisée par une faible croissance.

A chaque révolution industrielle est associée une combinaison d'innovations qui apparaissent simultanément au sein du système énergétique, du système des transports, des procédés de fabrication et des moyens de communication. A la base de ces évolutions de long terme, les innovations jouent un rôle majeur et sont le vecteur de la croissance économique.

Le système énergétique de la troisième révolution industrielle s'appuie sur le développement du nucléaire, du solaire et plus largement des ressources renouvelables. Il laisse une place plus modeste aux ressources énergétiques fossiles. Ainsi, cette troisième révolution industrielle permettra avec l'augmentation des capacités intellectuelles de maîtriser la dot terrestre, de produire tous les produits. Avec l'attention portée à la biomasse, à l'essor prochain de l'aquaculture ou encore avec l'utilisation du génie génétique, l'humanité revient à ses besoins primordiaux. A partir de maintenant l'innovation va couvrir tout le spectre des besoins et des activités et, de plus, va impliquer un accroissement à la fois des capacités physiques et intellectuelles.

Il semble dès lors que l'on revienne à une période de l'humanité où seules les énergies renouvelables pouvaient être utilisées mais à ceci près, que maintenant, avec les progrès survenus, on puisse espérer qu'elles satisferont nos besoins croissants en énergie.

Ces différents travaux étudient l'importance des innovations au regard des longs cycles de l'activité économique. Il y a cependant une différence particulière entre la thèse de KONDRATIEV et celle de SHUMPETER, laquelle a semble-t-il inspiré RAY, MARCHETTI et PIATIER dans leurs analyses.

Pour KONDRATIEV, le rythme du long cycle est l'expression des forces internes, des mécanismes régulateurs propres du capitalisme. Les longs cycles selon lui "arise out of causes which are inherent in the essence of the capitalist economy"(1). Le fonctionnement cyclique de l'économie capitaliste modèle les conditions nécessaires à l'innovation technologique. Plus précisément, les activités technologiques occupent une place particulière : elles sont des variables dépendantes. Le volume et le rythme d'apparition des innovations sont déterminés par ces forces qui façonnent le rythme du développement capitaliste. Les innovations sont donc structurées et leur rythme

(1) N.D. KONDRATIEV, "The long waves in economic life", *Review Spring* 1979, 4, p.543.

déterminé par ces mouvements de long terme.

Au contraire, pour SCHUMPTER, la cause des "longs cycles" est le processus d'innovation. Au centre de sa théorie des cycles longs, il existe des révolutions technologiques, des "tempêtes de destruction créatrice". Il s'agit de transformations profondes (chemin de fer, énergie électrique). Ces innovations majeures entraînent des grappes d'innovations qui se localisent à un moment précis dans le temps.

Ces grappes vont orienter les longs cycles en générant des périodes d'accélération des taux de croissance. Leur diffusion est totale : tous les secteurs de l'économie sont affectés par le nouveau système technologique qui se met en place.

L'innovation est à la fois au centre de l'instabilité cyclique et de la croissance économique. Les cycles de l'activité économique -par le biais des fluctuations du niveau d'investissement- sont la conséquence des fluctuations du processus d'innovation. Le changement technologique est au coeur des longs cycles.

C'est de cette conceptions des longs cycles que relèvent respectivement les études de RAY, MARCHETTI et PIATIER. La pierre angulaire des mouvements de long terme est le processus d'innovation en tant que générateur de nouvelles formes d'énergie maîtrisables par l'homme.

Cependant, si ces travaux ont le mérite de révéler la régularité cyclique à la fois des systèmes énergétiques et des grappes d'innovation, l'hypothèse de long cycle à laquelle ils se réfèrent tous peut être discutée.

Nous citerons ici ROSENBERG et FRISCHTAK (1) qui se sont interrogés sur les conditions requises pour que l'innovation technologique génère des cycles longs et de périodicité définie par KONDRATIEV. "The process of technological innovation involves extremely complex relations among a set of key variables- inventions, innovations, diffusion paths and investment activity. A technological theory of long cycles needs to demonstrate that these variables interact in a manner that is compatible with the peculiar timing requirements of such cycles". (2) Il faudrait donc montrer que les facteurs macroéconomiques jouent un rôle majeur dans l'apparition de nouvelles technologies pour corroborer la théorie.

Ils soulignent notamment la difficulté de déduire un long cycle d'une innovation particulière. Cela

(1) N. ROSENBERG, C.R. FRISCHTAK, "Long waves and economic growth : a critical appraisal", *American economic review*, papers and proceedings, may 1983, vol.73, n°2, p.146-151.

(2) N. ROSENBERG, C.R. FRISCHTAK, opus cité, p.147.

résulte du fait que des améliorations substantielles vont apparaître longtemps après l'introduction de l'innovation initiale. Ainsi le cycle de KONDRATIEV associé à la machine à vapeur a-t-il débuté avec les inventions de Watt dans les années 1770 ? On peut en douter si l'on considère la lenteur de son adoption à la fin du 18^e siècle.

Mais, en outre, les améliorations associées à la machine elle-même ont entraîné des gains de productivité suffisants pour introduire la machine à vapeur dans de nombreux usages. Cela se produit un siècle après la contribution majeure de Watt.

Un autre point important de leur critique est qu'il ne suffit pas de montrer le sens de la relation causale entre l'innovation technologique et l'investissement ; de même que les facteurs économiques et technologiques qui déterminent l'adoption de nouvelles technologies le font de manière compatible avec le rythme du cycle de KONDRATIEV "... The waves repeat themselves over time, either because the wave-generating factors in the form of innovation clusters are themselves cyclical (or at least recur with a certain regularity) or because there is an endogenous mechanism in the economic system which necessarily and regularly brings a succession of turning points". (1)

La régularité récurrente des innovations doit être démontrée en incluant les "turning points" inhérents au processus. Il faudrait alors expliquer l'introduction et la diffusion de l'énergie nucléaire par exemple, comme une source d'énergie principale, comme un élément inévitable et intrinsèque de la formation d'un long cycle de 50 ans.

Même si l'hypothèse des longs cycles demeure controversée et mérite des recherches plus approfondies comme le suggèrent ROSENBERG et FRISCHTAK, nous pensons qu'elle a un pouvoir explicatif majeur dans l'évolution du système énergétique passé.

Pour autant, il serait insuffisant d'en rester là. Après avoir longuement observé le système énergétique sous l'angle technique, nous allons l'étudier au regard de l'évolution des besoins énergétiques. Il s'agit de comprendre la relation économie-énergie comme une relation particulière : les besoins ont induits l'utilisation de ressources énergétiques. Comment s'est traduit historiquement cette relation et quelle est son trend à long terme ? Nous allons tenter d'y répondre à présent.

(1) N. ROSENBERG, C.R. FRISCHTAK, opus cité, p.150.

§ 2 - Développement économique et énergie

L'étude des besoins énergétiques d'un point de vue historique permet d'appréhender une relation originale entre l'énergie et le développement économique. Le développement économique est allé de pair avec l'accroissement des besoins en énergie dans les civilisations industrielles. Cette évolution n'a pu être possible que grâce à l'apparition d'un surplus énergétique. Cette notion est définie par R. PASSET comme "la quantité d'énergie dont un système peut encore disposer après avoir satisfait à la reproduction des ressources naturelles, matérielles et humaines, sur la combinaison desquelles repose la formation des flux économiques" (1)

Jusqu'au néolithique, les sociétés de pêche, chasse et cueillette ne dégagent pas de surplus. Les premiers surplus vont apparaître avec la domestication des forces animales et avec l'utilisation des convertisseurs énergétiques plus efficaces que l'homme. L'utilisation du cheval, les progrès dans la mise en valeur du sol, l'utilisation de la voile pour les transports maritimes ou encore des rivières permettent l'obtention d'un tel surplus. La productivité énergétique des différentes activités économiques augmente en retour.

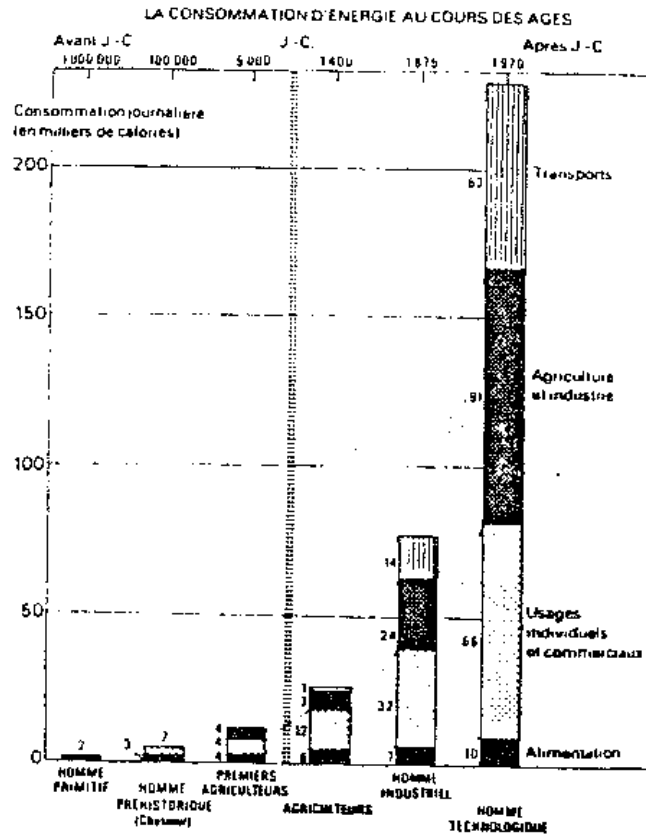
L'excédent d'énergie sert non seulement à faire croître quantitativement les variables économiques (processus de croissance) mais aussi exerce une action structurante sur le système économique. Il permet la création de nouvelles activités au sein du système et donc assure sa complexification et sa diversification. Il va alimenter un processus de développement.

Le rôle du surplus dans le développement des sociétés apparaît dans le schéma de la page suivante. La consommation croît de manière continue tandis qu'au fur et à mesure de l'écoulement du temps, les sociétés se diversifient et se complexifient.

D'une économie sans surplus (âge de pierre) dont les activités permettent une satisfaction alimentaire exclusive, on passe progressivement à une société dont les besoins domestiques sont encore limités (économie de chasse, de cueillette et de pêche). Puis, avec le néolithique, l'agriculture et l'élevage sédentaires font leur apparition. Des surplus agricoles sont rendus possibles par la maîtrise des convertisseurs biologiques : le sol est utilisé comme capteur d'énergie solaire, le cheval, le vent ou l'eau apportent une contribution énergétique importante dans les activités humaines. Le développement de l'Egypte ancienne s'est basée sur un surplus agricole qui représentait jusqu'à 20% du produit brut (2).

(1) R. PASSET, *L'économie et le vivant*, Payot, 1979, p.146

(2) R. PASSET, opus cité, p.148.



Source : R. PASSET, opus cité, p;149.

Avec la révolution industrielle, l'agriculture et l'industrie deviennent des grands utilisateurs de l'énergie. Les nouvelles techniques de production induites par l'apparition d'innovation nombreuses dans les industries de l'acier et du textile notamment font appel aux ressources énergétiques fossiles. L'amélioration de la qualité des métaux ou encore la substitution du charbon au bois, la substitution du coton à la laine permettent l'augmentation de la productivité énergétique et l'obtention d'un surplus économique.

Ce surplus joue un rôle dans l'industrialisation et dans le processus d'accumulation du capital. De plus, le recours aux énergies fossiles induit un changement d'échelle du surplus.

"A l'aube de la révolution industrielle, en Angleterre, un mineur crée par jour, en moyenne, un surplus de 2 720 CH sous forme de charbon qui, transformé par une machine à vapeur au rendement de 1% (ce qui correspond aux performances de l'époque), produira une énergie mécanique de 27 CH par journée de travailleur, soit le triple de l'excédent que dégageait l'activité agricole la plus efficace" (1).

(1) U. HEIERLI, "Bilans énergétiques et développement", *Les temps modernes*, août-septembre 1975, p.279-308.

CH : cheval-heure : c'est le travail exécuté pendant une heure pour une machine dont la puissance est un cheval vapeur. 1 CV = 736 watts

$$1 \text{ CV} = 736 \times 3600 = 2\,649\,600 \text{ watts}$$

De même, le développement des transports avec l'extension des chemins de fer contribue à l'augmentation du surplus. Nous pouvons citer quelques indicateurs énergétiques du développement dans les pays européens au 19^e siècle.

	GRANDE BRETAGNE	FRANCE	ALLEMAGNE
<i>Production de charbon, lignite (a)</i>			
1820-1824	17,70	1,10	1,20
1830-1834	22,80	2,00	1,90
1850-1854	50,20	5,30	9,20
1870-1874	123,20	15,40	41,40
1890-1894	183,20	26,30	94,00
1910-1913	275,40	39,90	247,50
<i>Production d'acier (a)</i>			
1870-1874	0,49	0,13	0,21
1890-1894	3,19	0,77	2,89
1910--1913	6,93	4,09	16,24
<i>Capacité des machines à vapeur (b)</i>			
1840	0,62	0,09	0,04
1850	1,29	0,27	0,26
1870	4,04	1,85	2,48
1896	13,70	5,92	8,08
<i>Consommation de coton (a)</i>			
1781-1790	8,10	4,00	
1825-1834	105,60	33,50	3,90
1855-1864	369,40	74,10	42,00
1885-1894	691,80	127,00	208,20
<i>Lignes chemin de fer (c)</i>			
1840	2,39	0,50	0,47
1860	14,60	9,17	11,09
1880	25,06	23,09	33,84
1900	30,08	38,11	51,68
<i>Production énergie électrique (d)</i>			
1907	2,70	0,70	3,20
1913	4,80	1,80	8,00
1920	8,50	5,80	14,50
1930	17,70	16,90	29,10
<i>Production d'automobiles (e)</i>			
1905	32	22	27
1913	208	125	93
1930	1 524	1 460	679
1938	2 422	2 251	1 816

Source : données d'après G.F. RAY "Energy and the Long Cycles" , Energy Economics, January 1983, p. 6.

- (a) Moyennes annuelles, million de tonnes
- (b) En million de HP (Horse-Power) 1 HP = 746 watts = 1,014 CV
- (c) En millier de kilomètres
- (d) En milliard de kwh
- (e) En millier de véhicules.

La société post-industrielle va diversifier les transports et accélérer leur développement. Les sources d'énergie fossiles vont largement répondre aux besoins thermiques, d'éclairage, de force motrice ainsi qu'aux besoins de matières premières.

On assiste donc à un accroissement continu de la puissance avec une accélération depuis le 19^e siècle. Cela résulte des progrès techniques majeurs qui affectent d'abord la machine à vapeur dont la puissance, le rendement va augmenter régulièrement jusqu'à la fin du 19^e siècle (1). Des progrès techniques relatifs à l'extraction des ressources fossiles vont accroître les volumes produits. Des rendements thermodynamiques meilleurs traduisent un meilleur fonctionnement des convertisseurs énergétiques. Non seulement la puissance augmente mais l'homme parvient à mieux maîtriser les énergies.

Après avoir maîtrisé l'utilisation des énergies animales puis des énergies naturelles, la maîtrise des énergies physico-chimiques s'est révélée avec la machine à vapeur, l'électricité et la poussée de fusée (2). Ces 3 phases, liées à la nature des ressources énergétiques traduisent en fait une consommation énergétique croissante induite par des besoins sans cesse changeants.

Il convient ici d'apporter une précision sur ce que l'on entend par consommation d'énergie. La consommation énergétique peut être analysée en effet sous 2 angles : elle peut être relative aux énergies primaires ou aux énergies finales.

S'il s'agit des énergies primaires, la consommation d'énergie fera référence à leur utilisation sans transformation préalable. Dans ce cas, les ressources énergétiques sont considérées comme des

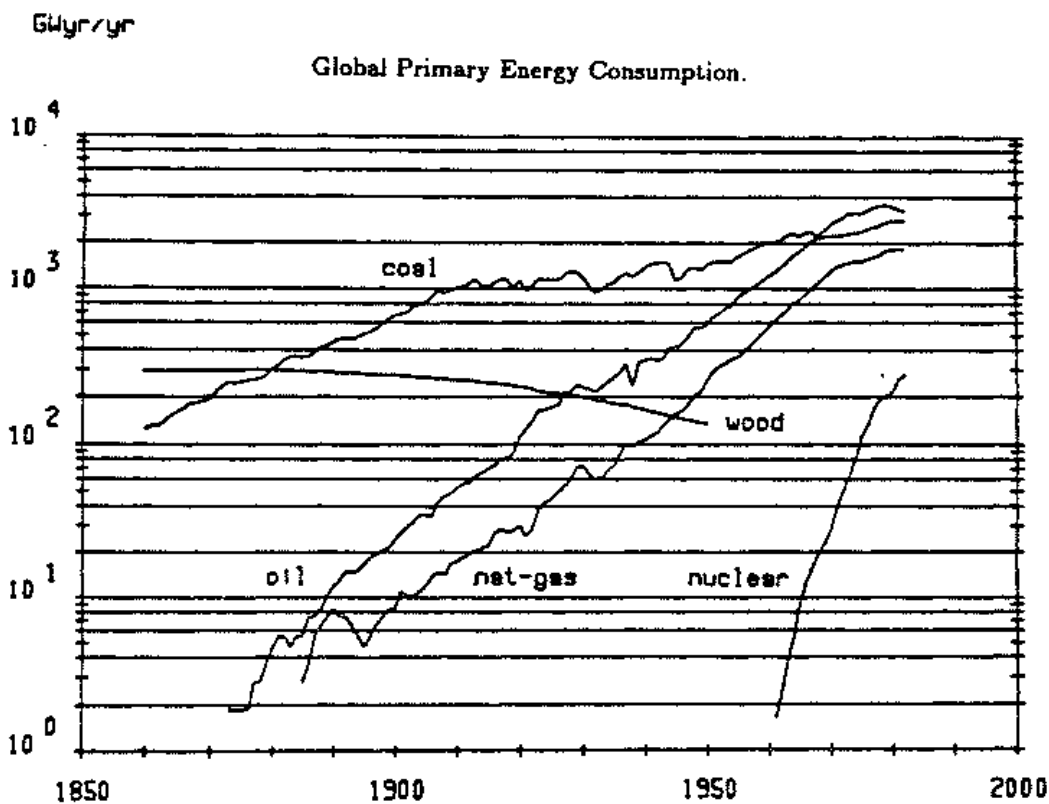
(1) P. BAIROCH, "Energie et révolution industrielle : nouvelles perspectives", *Revue de l'énergie*, n°356, août -septembre 1983, p.405.

(2) F. MEYER, *La surchauffe de la croissance, essai sur la dynamique de l'évolution*, 1974, Fayard, p.35-59.

produits bruts. Les énergies finales sont obtenues à partir des énergies primaires par transformation (produits pétroliers et charbonniers par exemple) ou par élaboration d'une nouvelle forme d'énergie, appelée "vecteur énergétique" (l'électricité est un des exemples possibles). La consommation d'énergie finale fera alors référence à l'usage des énergies primaires transformées ; elle permet la satisfaction des besoins énergétiques de l'utilisateur.

Nous allons dans un premier temps nous intéresser à la consommation d'énergie primaire à travers l'examen des travaux de K. NAKICENOVIC (1) qui a étudié son évolution depuis 1850.

Sur le graphique où les données historiques sont rapportées sur une échelle semi logarithmique, son évolution se caractérise par des phases de croissance exponentielle fragmentées le long des tendances linéaires. La consommation de bois au niveau global a diminué comme source d'énergie commerciale alors que ce combustible représentait au 19^e siècle la plus grande partie des inputs commerciaux d'énergie primaire.



Source: N. NAKICENOVIC, Dynamics of change and long waves, p. 25.

(1) N. NAKICENOVIC, *Dynamics of change and long waves*, Working paper, June 1988, IIASA.

Avec l'expansion des chemins de fer et de l'industrie de l'acier, ainsi qu'avec les applications de la vapeur, l'utilisation du charbon s'est accrue de manière exponentielle jusque dans les années 1910 où une nouvelle phase de croissance plus lente a démarré. Tandis que la consommation de charbon s'effectue à un rythme lent, le pétrole et le gaz naturel sont consommés à des rythmes beaucoup plus rapides. Les courbes relatives au pétrole et au gaz naturel ont une pente identique et donc des taux de croissance sensiblement les mêmes (changement de direction tous les 15 ans). L'utilisation accrue de ces deux ressources est liée à la croissance des industries pétrochimique et électrique ainsi qu'à l'usage répandu de la combustion interne et des sources d'énergie électrique.

Pour l'auteur, les phases de saturation du charbon et de pétrole correspondent respectivement aux années 1920 et 1980 ; cela d'ailleurs en harmonie avec le rythme du dernier cycle de KONDRATIEV. Une première phase de croissance jusque dans les années 1920 se caractérise par l'expansion du charbon, des chemins de fer et de l'industrie sidérurgique. Une seconde phase de croissance correspond à l'expansion du pétrole, de l'industrie pétrochimique, de l'électricité et transports terrestres.

L'étude de la consommation d'énergie globale par tête est donc ponctuée par ces deux phases de croissance qui reflètent la substitution entre les sources d'énergie primaires (1). L'énergie nucléaire est encore dans sa phase de développement aujourd'hui. De ce fait, la croissance rapide que l'on peut observer ces 20 dernières années, ne permet pas de dire que cette expansion rapide va se poursuivre dans le futur. D'ailleurs, la croissance s'est ralentie au début des années 1980.

La consommation d'énergie primaire globale s'est donc accrue de manière exponentielle. Son taux de croissance moyen est de l'ordre de 2% par an. Le déclin des sources d'énergie antérieures est plus que compensé par la croissance rapide de nouvelles ressources énergétiques. Cela traduit ainsi le processus d'accélération qui s'opère dans le remplacement d'anciennes technologies par de nouvelles et, finalement, cela traduit l'évolution du système énergétique.

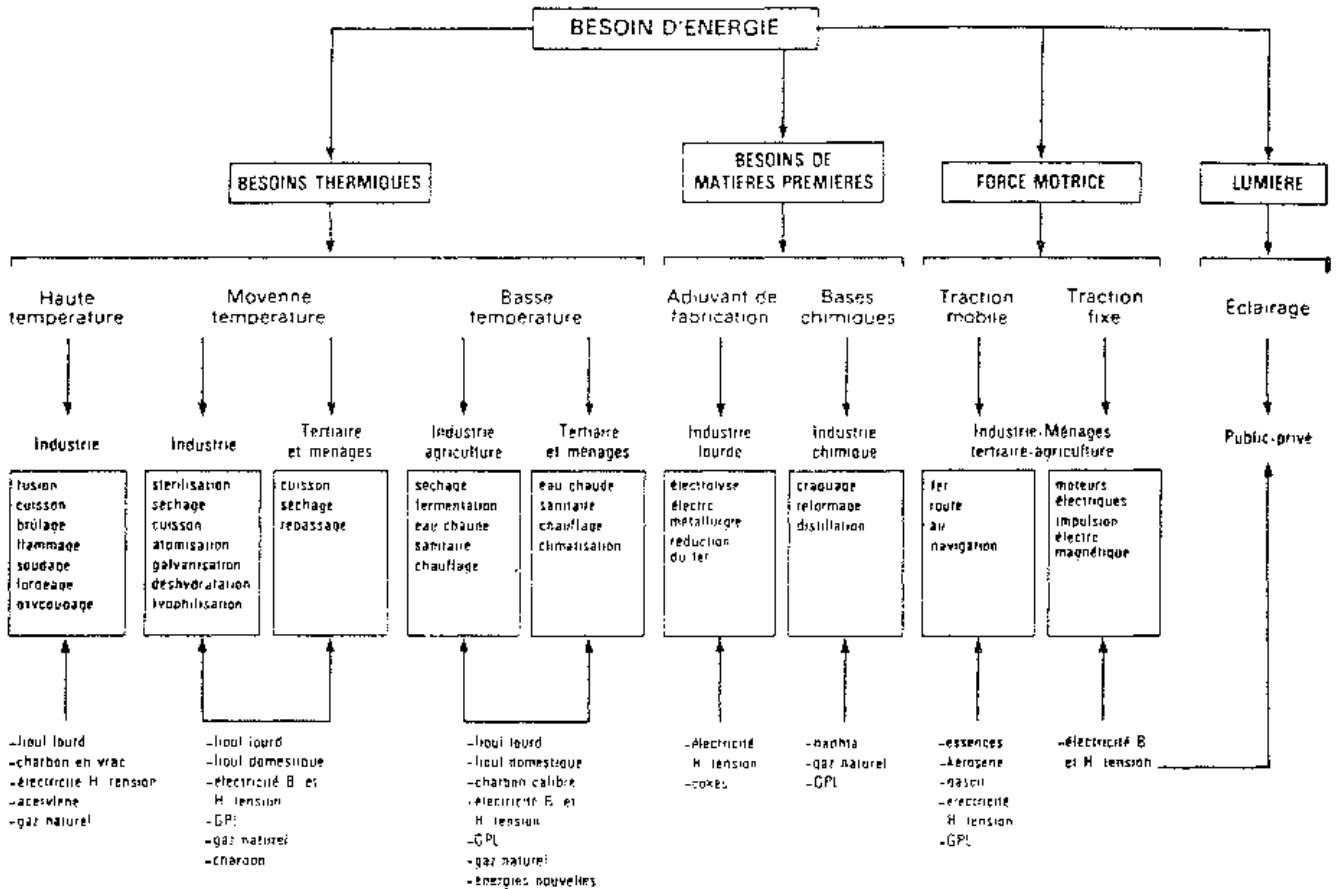
L'étude de la consommation énergétique à travers sa composante primaire ne suffit pas pour éclairer l'évolution des besoins énergétiques dans son ensemble.

Il convient dès lors d'apporter un éclairage sur les quantités d'énergie finales consommées. Pour y parvenir, il faut déterminer quels sont les différents besoins énergétiques que permet de satisfaire l'énergie. Autrement dit, les consommations d'énergie étant l'expression de besoins énergétiques particuliers, nous allons apporter quelques précisions sur la nature de ces besoins.

(1) N. NAKICENOVIC, opus cité, p.27.

Reprenant le classement proposé dans l'ouvrage collectif de JM CHEVALIER (1), nous distinguons 4 sortes de besoins énergétiques : les besoins thermiques, les besoins de force motrice, les besoins de lumière et les besoins de matières premières.

Du besoin d'énergie aux utilisations finales des énergies



L'ensemble des consommations d'énergie finale a évolué sous les effets conjugués des révolutions technologiques, de l'apparition de nouvelles sources d'énergie et des phénomènes de substitutions entre ressources énergétiques.

Des innovations telles que la machine à vapeur, le moteur à explosion, le moteur électrique ou la turbine hydraulique sont autant de processus nouveaux qui permettent de répondre aux besoins

(1) J-M CHEVALIER, L. BENZONI, BARBET, *Economie de l'énergie*, Dalloz, 1986, p.14.

de force motrice croissants. Avec le développement des chemins de fer, de l'automobile, du transport maritime, les consommations de produits pétroliers augmentent.

Dans l'agriculture, la mécanisation implique aussi une consommation de carburant supplémentaire. L'évolution des consommations d'énergie dans l'agriculture s'explique par les effets induits de la motorisation et de l'amélioration de la productivité du sol issue de l'utilisation de produits fertilisants.

Tandis que jusqu'à la fin du 19^e siècle, c'est principalement la force animale qui est utilisée, avec le développement du pétrole vers 1925 la consommation de combustibles et de carburants progresse peu à peu ; les besoins en énergie thermique jusqu'alors inexistantes font leur apparition. Il y a non seulement un accroissement des besoins issus de l'industrialisation mais aussi des changements dans les utilisations finales. Le tableau ci-dessous est à ce titre révélateur.

Evolution de la production et de la consommation d'énergie de l'agriculture française

Année	1800	1862	1892	1929	1970
— Energie indirecte (1.000 tep)					
- outillages, machines, équipements	45	96	110	413	1.563
- bâtiments de production	?	?	?	253	798
- engrais chimiques	—	49	190	836	2.931
- autres (matériaux, matières diverses)	?	?	?	?	1.381
- aliments du bétail importés	—	—	—	?	1.625
— Energie directe (1.000 tep)					
- travail animal (1)	124	179	167	239	22
- carburants, combustibles, électricité	—	—	—	7	5.570
Total d'énergie directe et indirecte:	184	344	487	1.846	13.780
(dont énergie fossile):	(60)	(165)	(320)	(1.607)	(13.768)
Rendement moyen de production de blé en quintaux par hectare	6 - 8	—	9 - 12	15 - 16	55 - 60
Personnes nourries par un travailleur agricole	2	—	—	7 - 8	60

(1) Le travail animal a été comptabilisé selon le travail mécanique délivré et non en fonction de la valeur énergétique de son alimentation.

Source : Conférence Mondiale de l'Energie, Cannes 1986.

Aujourd'hui, les consommations d'énergie par usages ont sensiblement changé.

Consommation d'énergie par l'agriculture française en 1985

- Energie directe:			
- force motrice	3,0 Mtep	}	5,0 Mtep
- énergie thermique	2,0 Mtep		
- Energie indirecte:			
- engrais et amendements	3,4 Mtep	}	8,5 Mtep
- produits phytosanitaires et vétérinaires	0,65 Mtep		
- produits divers	0,10 Mtep		
- fabrication des aliments du bétail	0,50 Mtep		
- aliments du bétail importés	0,85 Mtep		
- bâtiments	1 Mtep		
- matériel et équipements (y compris réparations)	2,0 Mtep		
Total			

Source : Conférence Mondiale de l'Energie, Cannes 1986.

Dans les pays développés, on considère ainsi l'agriculture comme productrice nette d'énergie. Grâce à la valorisation de l'énergie solaire, la production d'énergie sous forme d'aliments est toujours supérieure à la consommation (ratio de 1,5 à 2). Ce qui est loin d'être le cas des pays en développement.

Du côté des consommations en électricité, elles n'ont cessé d'augmenter depuis la révolution industrielle. Après l'utilisation du gaz lampant, l'utilisation de l'électricité se généralise et affecte tous les secteurs de l'activité économique. Les besoins de chaleur et vapeur d'abord satisfaits par la consommation de charbon, vont peu à peu être largement couverts par le pétrole, l'électricité et le gaz naturel.

Enfin, les ressources énergétiques servent de produits de base à l'industrie lourde et à l'industrie chimique. Avec la pétrochimie, les besoins en pétrole ont augmenté. Avec la production d'engrais croissante liée à l'amélioration de la productivité des sols, c'est le gaz naturel qui est largement sollicité. Avec l'électro-métallurgie, l'électrolyse, c'est l'électricité. Quant au charbon, il permet la réduction de l'oxyde de fer.

L'innovation technologique et les ressources énergétiques disponibles permettent de répondre aux besoins diversifiés des sociétés, lesquels correspondent au processus de développement amorcé depuis le néolithique. Ainsi dans les pays industrialisés, les grandes quantités d'énergie finale consommées peuvent-elles être appréciées par l'exemple éloquent relatif à l'énergie méca-

nique disponible en France. Vers 1800, elle correspond à 3 000 heures d'équivalent travail disponible par personne active et par an ; 1 000 heures effectuées par l'homme et 2000 par les machines et les animaux. En 1987, c'est une disponibilité de 50 000 heures d'équivalent travail ; 1 000 pour l'homme et 49 000 pour les machines et les animaux (1).

L'élévation de la consommation finale d'énergie a donc été possible grâce aux innovations technologiques d'une part et à la disponibilité des ressources d'autre part.

En même temps que les usages énergétiques devenaient plus importants, leur nombre augmentait avec l'apparition de nouvelles sources d'énergie. La réponse à la variété des besoins énergétique qu'induit le développement économique a été le recours à un plus grand nombre de ressources énergétiques.

Le développement économique s'est opéré avec l'exploitation de nouvelles sources d'énergie et la découverte de nouveaux gisements. La poursuite du développement économique implique donc la mise en valeur et la maîtrise accrue des ressources énergétiques. Il ne peut être conçu sans une connaissance approfondie du patrimoine énergétique.

L'objet de la prochaine section consistera en l'évaluation des ressources énergétiques. A partir de là, il sera possible d'engager une réflexion sur les perspectives énergétiques pour le siècle prochain.

(1) J-P DELEAGE, "L'homme et l'énergie au cours des âges", *Les Cahiers Français*, mai-juin 1988, p.10.

Section 3 - L'état du patrimoine énergétique

§1 - Les ressources énergétiques : une vue panoramique

Le patrimoine énergétique de la planète est composé d'un ensemble de sources d'énergie ou ressources énergétiques dont les propriétés principales sont la diversité et la permanence. On peut opérer une partition de l'ensemble en dissociant les ressources non renouvelables - dites épuisables ou encore fossiles - des ressources renouvelables.

La notion de patrimoine implique une permanence dans le temps et conduit à comparer les temps de constitution des ressources énergétiques. Cette implication est d'une importance majeure dans l'appréciation des ressources dont dispose l'humanité. Les ressources non renouvelables résultent de la fossilisation de substances végétales des premiers âges. Elles sont contenues dans les couches minérales liées aux formations géologiques et représentent donc du temps accumulé.

Non seulement les stocks de ressources sont menacés par l'exploitation intensive de l'homme, mais temps de constitution sont sans commune mesure avec l'échelle de temps humaine. Pour le charbon par exemple, le dépôt initial de la matière organique (tourbière) a nécessité un minimum de 5 000 ans. La transformation de cette tourbière en lignite et charbon s'est effectué en un minimum de 30 ou 40 millions d'années compte tenu de la vitesse d'enfouissement (1).

Comme le souligne à juste titre H. GUITTON (2), tandis que les ressources fossiles sont facilement extractibles, les développements industriels se sont appuyés sur d'importantes consommations de charbon, puis de pétrole sans prendre en compte le caractère fini de la ressource et donc in fine le problème de son épuisement.

Dans le bilan énergétique mondial, les énergies épuisables assurent près de 90% de la consommation mondiale d'énergie primaire (i.e. potentiel énergétique brut livré par la nature) (3). Cette prédominance des énergies fossiles devrait assurément être reconsidérée et discutée au regard au regard du temps accumulé que ces énergies contiennent.

(1) P-H BOURRELIER, R. DIETRICH, *Le mobile et la planète ou l'enjeu des ressources naturelles*, Economica, 1989, p.147.

(2) H. GUITTON, *Le sens de la durée*, 1985, p.156;

(3) J-M CHEVALIER et al., *Economie de l'énergie*, Dalloz, 1986, p.22-23.

Aux côtés des ressources fossiles que sont le pétrole, le charbon, le gaz naturel et l'uranium, figurent les ressources renouvelables dont l'exploitation est peu limitée dans le temps et dont, la permanence est absolue. Leur inscription dans la durée se traduit par des flux. On distingue les énergies issues d'un renouvellement de chaleur (solaire, géothermie), d'un renouvellement de mouvement (éolienne, hydraulique, marémotrice et énergie des vagues) ou d'un renouvellement de matière (biomasse).

Le flux solaire constitue la plus importante ressource énergétique avec une puissance de 179000×10^9 kw. Il est suivi par la géothermie avec 32×10^9 kw et l'énergie marémotrice avec seulement 3×10^9 kW. La surface terrestre ne reçoit cependant que 70% du flux solaire, les 30% restant sont perdus par réflexion directe vers l'espace. Près de la moitié du flux est directement transformé en chaleur, 23% sont relatifs aux phénomènes d'évaporation, de précipitations sous forme thermique (rôle dans le cycle de l'eau). Mais seulement 2‰ du flux suffit pour provoquer les vents, les vagues et à peine 0,23‰ est converti en énergie biochimique par le processus de la photosynthèse. L'énergie éolienne, l'énergie hydraulique, l'énergie des vagues et la biomasse ne sont en réalité que des formes dérivées du flux solaire in fine (1).

A strictement parler, les ressources géothermiques ne sont pas renouvelables à l'échelle de l'espèce humaine comme le sont le flux solaire et l'énergie marémotrice. Les réservoirs géothermiques peuvent s'épuiser au bout de quelques décennies si aucune gestion de leur exploitation ne respecte leur rythme de renouvellement. Ainsi, pour un flux géothermique, le rétablissement de l'équilibre thermique équivaut à 25 fois le temps d'exploitation (2).

Les ressources géothermiques doivent donc faire l'objet d'une gestion rigoureuse si l'on souhaite ne pas épuiser les gisements trop rapidement afin qu'ils se renouvellent. Malgré cette réserve, nous considérons la géothermie comme faisant partie des ressources renouvelables. A l'échelle géologique, le temps de reconstitution de cette ressource est très court et n'a donc rien à voir avec celui d'une ressource non renouvelable comme le charbon. Les caractéristiques de la ressource géothermique sont ainsi beaucoup plus semblables à celles des autres ressources renouvelables.

Ainsi, le patrimoine énergétique est caractérisé par la permanence de flux et de stocks. Alors que les flux ont une capacité de renouvellement grande, les stocks relatifs à des gisements fossiles sont dans l'impossibilité de se régénérer sur une période de temps courte à l'échelle géologique.

(1) F. RAMADE, *Ecologie des ressources naturelles*, 1981, Masson, p.67 et suivantes.

(2) P-H BOURRELIER, R. DIETRICH, op. cité, p.147.

Comme nous l'avons souligné, les ressources fossiles nécessitent un temps de formation long alors que leur extraction est très rapide (1). De plus, la captation des stocks s'est avérée plus facile que celle des flux, d'où une faible place laissée aux ressources renouvelables dans les usages énergétiques. Le fait que ces énergies, au lieu d'être concentrées dans des gisements, soient diluées, diffuses et donc peu concentrées, a induit des utilisations souvent marginales (exemples de l'énergie éolienne et de l'énergie marémotrice).

Nous pouvons alors sur la base de la dissociation renouvelable/non renouvelable approcher quantitativement le patrimoine énergétique dans le temps.

Il convient cependant d'apporter une précision sur la notion de ressource. Ce concept est relatif à des considérations géologiques exclusivement. On définit par ressource une "quantité théorique estimée à partir de considérations physiques sans contrainte technique ni économique". (2) Le concept de ressource englobe ainsi tous les gisements dont l'existence est géologiquement prouvée et les gisements supposés existants, qu'ils soient ou non exploitables économiquement avec les technologies existantes.

Aux côtés de cette mesure géologique, une notion économique peut être définie à travers le concept de réserve. Ce concept est restreint à la part des ressources géologiquement identifiées qui ont une valeur économique, en ce sens où leur exploitation est économiquement rentable aux conditions technologiques du moment.

A travers ces 2 concepts d'essence différente, il est donc possible d'appréhender et de classer les gisements de ressources énergétiques selon les connaissances géologiques et selon la faisabilité économique de l'extraction.

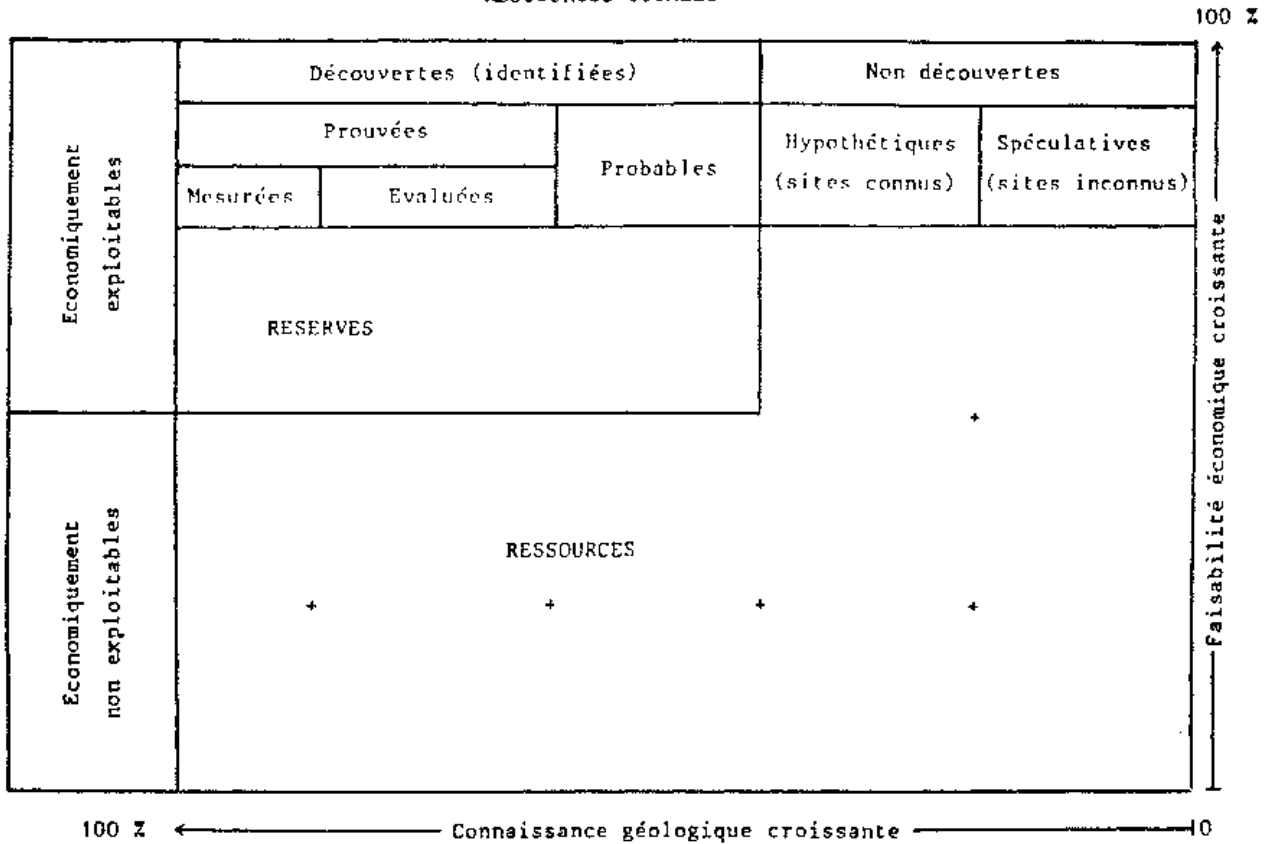
C'est l'objet de la classification issue des travaux de Mac Kelvey (3)

(1) Selon J. de ROSNAY, nous consommons actuellement en un an des ressources qu'il a fallu un million d'années pour constituer.

(2) CNRS/CPE, *Atlas mondial de l'énergie*, Aditech, 1989, p.49.

(3) E. CAMPAN, *Aspects physiques, économiques et juridiques de l'exploitation des ressources non renouvelables*, Rapport technique n°8814, décembre 1988, Université de Toulouse I.

RESSOURCES TOTALES



Considérant ces différents concepts et leur intérêt pour apprécier le patrimoine énergétique, nous allons procéder à l'analyse économique de l'ensemble des ressources.

A. Les ressources fossiles

A l'échelle mondiale, l'évaluation des ressources non renouvelables révèle d'importantes réserves. Selon l'enquête sur les ressources énergétiques effectuée au sein de la conférence mondiale de l'énergie en 1986 (1), l'humanité dispose de 1106 Gtep de réserves prouvées et de 3 227 Gtep de réserves additionnelles. Cet ensemble de réserves correspond à la part des ressources la mieux connue. Il s'agit pour les réserves prouvées des réserves prouvées récupérables qui sont définies comme "la fraction des quantités en place qui peut être récupérée (extraite sous forme brute) aux conditions économiques locales actuelles et à venir, avec les technologies existantes" (2)

(1) J-R FRISCH, *Abondance énergétique, mythe ou réalité ? Le projet ATRE*, octobre 1986, Technip. Il s'agit de données relatives à 1984.

1Gtep = 109 tep.

(2) J-R FRISCH, opus cité, p.229.

Quant aux réserves additionnelles, ce sont les réserves additionnelles récupérables. Les quantités additionnelles récupérables sont définies comme "la fraction des réserves additionnelles en place qui pourrait être récupérée sous certaines limites économiques et technologiques prévisibles" (1).

Les réserves additionnelles sont trois fois plus importantes que les réserves prouvées. Les réserves additionnelles se transforment en nouvelles réserves prouvées dans le temps du fait de l'exploration.

La répartition des réserves par source d'énergie fait apparaître le poids écrasant des combustibles minéraux solides (charbons bitumineux, sous bitumineux, lignite et tourbe). Ils représentent à eux seuls 81% des réserves prouvées et 84% des réserves additionnelles. Les hydrocarbures (pétrole et gaz naturel) ne représentent que 17% des réserves prouvées et 15% des réserves additionnelles. Quant à l'uranium, ses réserves prouvées constituent 2% de l'ensemble et 1% pour les réserves additionnelles.

Nous pouvons rassembler les principaux éléments issus des travaux de J-R FRISCH dans le tableau suivant :

Réserves d'énergies non renouvelables (quantités récupérables) en Gtep

	Réserves prouvées	Réserves Addit.	RP + RA	Réserves spéculat.
Combustibles minéraux solides	896	2 699	3595	
Pétrole conventionnel (2)	97	36	133	
Pétrole non conventionnel (3)	13	304	317	(4) 179
Gaz naturel	74	156	230	
Uranium (1)	26	32	58	105
Total des énergies non renouvelables	1 106	3 227	4 333	

(1) Option réacteurs actuels (1 t U₂ = 8 000 tep)

(2) brut et GPL

(3) Schistes bitumineux et sables asphaltiques

(4) Y compris 4 Gtep en antarctique

Il est clair que cette coupe instantanée appartient à un processus dynamique = les stocks évoluent dans le temps. Les réserves d'énergies fossiles sont régulièrement estimées. Ces estima-

(1) J-R FRISCH, opus cité, p.230.

tions sont sans cesse remises en cause par l'extraction, le rythme des découvertes et l'évolution technologique.

L'évolution des réserves de pétrole illustre tout à fait bien le phénomène.

Réserves prouvées récupérables de pétrole brut au 1er janvier (en millions de tonnes)

pour l'ensemble du monde :

1950	1960	1970	1973	1976	1977	1978	1979	1980	1984	1988	1989
11 004	41 863	73 369	86 096	89 863	87 781	88 110	87 532	87 534	92 300	121 546	123 798

Différentes sources : Oil and gas Journal, Bulletin analytique pétrolier

Avant 1970, 1 t = 7 barils - A partir de 1970, 1 t = 7,33 barils

La localisation des réserves fossiles (1) à l'échelle mondiale fait apparaître une profonde inégalité dans la répartition des gisements. Les réserves prouvées de pétrole sont fortement concentrées au Proche-Orient (65,8%), en Amérique Latine (12%), en Afrique (5,9%) et en URSS (5,7%). Dans les autres grandes régions du monde, elles sont peu significatives. Les pays de l'OPEP totalisent à eux seuls les trois quart de ces réserves. Pour le gaz naturel, la répartition géographique est moins inégale. Particulièrement concentrées en URSS (40%) et au Proche-Orient (29%), les réserves prouvées mondiales sont réparties pour le reste dans un grand nombre de pays (Europe Occidentale (4,4%), Asie (6,3%), Amérique du Nord (5,7%) et Amérique Latine (5,7%).

Les réserves de charbon (y compris lignite) sont équitablement réparties (pays en développement inclus). Trois régions sont néanmoins dotées d'importantes réserves = l'URSS (15%), la Chine (45%) et l'Amérique du Nord (14%). A côté d'elles, l'Europe de l'Ouest, l'Afrique et l'Australie disposent de réserves plus modestes.

Enfin les réserves d'uranium (2) sont fortement dispersées dans le monde mais 82% de ces réserves sont concentrées dans six pays. Par ordre d'importance décroissante, on a =Australie

(1) Ministère de l'industrie et du commerce extérieur, DGEMP, *Les chiffres clés de l'énergie*, Dunod, 1992.

(2) OCDE, *Uranium, ressources, production et demande*, 1988, p.19.

(29%), l'Afrique du Sud (15%), le Niger (11%), le Brésil (10%), le Canada (9%) et les USA (8%)%.

Globalement l'offre de ressources est relativement concentrée.

En 1985, 11 pays assurent 90% de la production de charbon, 20 pays assurent 90% de la production de pétrole et 15 pour le gaz naturel (1). Il faut noter cependant que certaines réserves sont mieux connues que d'autres, C'est le cas du charbon. L'évaluation des réserves prouvées ne pose pas de problèmes compte tenu de la formation spécifique des gisements. Pour les réserves de pétrole, de gaz naturel ou d'uranium, il est plus difficile de faire des évaluations précises (2). Des bassins sédimentaires d'accès difficile qui n'ont pas fait l'objet de prospection pourraient contenir des réserves importantes.

Même s'il existe des incertitudes géologiques, les ressources énergétiques fossiles sont mesurables et peuvent donc être estimées. Les réévaluations successives auxquelles donnent lieu les réserves fossiles traduisent les progrès technologiques réalisés dans l'extraction des ressources et sont donc fortement corrélés au coût d'extraction. Le volume des réserves récupérables dépend du prix que l'on est disposé à payer pour extraire une ressource fossile particulière. On peut donc classer les réserves par tranches de coût. Ce classement tient compte de paramètres relatifs à l'extraction (profondeur, régularité...) et à la qualité de la ressource (concentration). Nous citerons l'exemple du pétrole, de l'uranium et du charbon.

Les réserves pétrolières sont estimées en pétrole récupérable. Elles sont dépendantes du coefficient de récupération estimé. Avec l'amélioration des méthodes de récupération, elles peuvent faire l'objet d'une réévaluation pour un gisement donné. D'après l'étude réalisée par P. H. BOURRELIER et R. DIETRICH (3), le bilan des ressources pétrolières compte tenu des coûts est le suivant :

(1) P. RAMAIN, "L'énergie dans le monde", *Les Cahiers Français*, n°236, mai-juin 1988, p.17.

(2) OCDE/AIE, *Perspectives énergétiques mondiales*, 1982, p.244-247.

(3) P-H BOURRELIER, R. DIETRICH, opus cité, p.214.

Coût en \$ baril

30		> 150 (2)		
20		35	70 à 110 (1)	
12	5	45	20	
4	20	35	30	
	70	0	20	
	certaines	récupération améliorée	spéculatives	catégories de réserves

Estimation en milliards de tonnes

Notes :

(1) 40 à 80 : dans les mers profondes et les zones arctiques

30 : huiles extra-lourdes

(2) 15 : récupération assistée

10 à 20 : mers profondes et zones arctiques

> 120 : huiles lourdes, sables asphaltiques, schistes bitumineux

Les réserves de pétrole non conventionnel constituent des volumes importants dont les coûts de production dépassent largement 30 \$ le baril. Les réserves additionnelles correspondent aux ressources résultant d'une amélioration de la récupération. Elles se situent dans des tranches de coût supérieures aux réserves initiales (certaines)

Par ailleurs, les gisements ayant des différences de qualité et d'accessibilité importantes, les coûts de production en \$ par baril vont être très hétérogènes selon la localisation des gisements. On constate des écarts importants qui vont, compte tenu de l'unicité du prix sur le marché, générer des rentes différentielles pour les gisements dont les coûts sont les plus faibles par rapport au gisement marginal.

	Coût en \$/baril
Moyen-Orient (terre et mer)	0,5 à 4
Afrique (terre et mer)	2 à 12+
Etats-Unis (terre, mer, Alaska)	2 à 15+
Europe (mer du Nord)	5 à 20+

Source : Institut Français du Pétrole, CME, Cannes, Synthèse des travaux, p. 156

Dans le cas de l'uranium, il se caractérise par des teneurs très différentes (de quelques pourcents pour les gisements les plus riches - le plus riche est situé au Canada avec 10% d'uranium - à quelques pour mille pour les plus pauvres). Actuellement, on exploite des gisements dont la teneur descend pour certains jusqu'à 0,5 pour mille.

La limite des coûts de prospection est fixée à 130 \$/kg de concentré d'uranium marchand. On n'exploite que les ressources dont le coût de production est inférieur à 80 \$/kg : c'est la part des ressources raisonnablement assurées qui constitue les réserves d'uranium.

Le tableau suivant issu de l'étude précitée résume les réserves d'uranium en fonction du coût d'extraction.

Coûts en \$/kg	Ressources en 1 000 tonnes U	
260	ressources considérables	
130	9000 à 12 000	
80	700	900
	1 600	1 600

Réserves : prouvées additionnelles spéculatives

On ne tient compte ici que du monde à économie de marché.

Les ressources connues sont constituées par les réserves prouvées et les réserves additionnelles récupérables à des coûts inférieurs à 130 \$/kg d'U (zone hachurée). On constate des dispari-

tés selon les localisations des gisements. Ainsi, en Australie, près de 90% des gisements sont exploitables à un coût inférieur à 80\$/kg d'U ; 100% pour le Brésil. Par contre aux Etats-Unis, près de 70% des gisements sont exploitables à un coût compris entre 80 et 130 \$/kg d'U (1).

Enfin, les ressources de charbon selon les coûts sont les suivantes :

Coûts en \$/TEP

150		1 500
75		1 000
50	100	1 100
25	440	1 800
15	290	4 00
	réserves prouvées	réserves spéculatives

En milliards de tonnes d'équivalent charbon

Compte tenu du fait que la qualité des gisements se dégrade avec la profondeur, les ressources n'ont pas été évaluées à des niveaux considérables. Les réserves économiques concernent la tranche de coût 15-50 \$/tec. Il existe des disparités selon les régions où sont situés les gisements. Le coût de production varie ainsi de 3 à 10\$/baril aux Etats-Unis tandis qu'en France il est compris entre 15 et 30 \$/baril (2). Selon le type d'extraction, le coût va varier. Concernant l'extraction à ciel ouvert qui tend à devenir prépondérante, les coûts peuvent être très faibles (inférieurs à 5\$ la tonne). L'extraction en mine souterraine a des coûts qui dépendent des conditions naturelles = de 15\$ la tonne pour les gisements les plus favorables à 150 \$ la tonne.

Pour l'ensemble des ressources possibles, les réserves qui par définition font référence aux ressources découvertes qui ont une valeur économique (3), représentent les quantités connues de ressources sur lesquelles va reposer le processus d'extraction, processus de production qui minimise le coût d'extraction de la ressource. Les quantités prélevées seront donc celles qui seront non seulement disponibles mais aussi accessibles avec la technologie du moment. L'évolution

(1) D'après OCDE, *Uranium, ressources, production et demande*, 1988.

(2) *Conférence mondiale de l'énergie, Synthèse des travaux*, 1986, p.156.

(3) Sur ce point, se référer à E. CAMPAN, opus cité, p.4.

des techniques permet non seulement d'extraire des quantités jusque là demeurées intactes mais aussi d'améliorer les taux de récupération.

Cependant, l'accroissement des réserves ne résulte pas seulement des réévaluations relatives à un gisement. Il est étroitement lié aux gisements nouveaux qui sont découverts. On ne peut dégager une tendance globale relative à l'ensemble des ressources fossiles. En effet, tandis que pour le charbon et le pétrole, peu de découvertes ont eu lieu depuis quelques années, ce qui explique que la réévaluation des gisements anciennement connus compte pour beaucoup dans l'accroissement des réserves mondiales, le gaz naturel a vu ses réserves augmenter du fait de la découverte de nouveaux gisements.

Dans le cas du pétrole, l'évolution du ration découvertes/production est de ce point de vue tout à fait significative.

1950-1959	5,14
1959-1969	2,96
1969-1979	1,46

Source : AIE, les perspectives énergétiques mondiales, 1982

La diminution du rythme des découvertes s'explique par le fait qu'au cours de la période 1945-1977, presque trois cinquièmes de toutes les découvertes ont été faites au Moyen-Orient. Il est peu probable que de nouvelles découvertes soient faite dans cette région du monde, tout comme l'on puisse réaliser ailleurs qu'au Moyen-Orient des découvertes plus importantes que par le passé.

Le rapport "découvertes/production" a évolué depuis 1976 comme suit :

1976	0,29
1977	1,11
1978	0,81
1979	1,00
1980	1,31
1981	2,09

Source : AIE, op. cité

Enfin, une autre explication réside dans la structure des gisements pétroliers. Depuis le milieu des années 60, on a découvert de moins en moins de gisements géants (réserves initiales entre 0,5 et 5 milliards de barils) et de gisements supergéants (réserves initiales supérieures à 5 milliards de barils). Cela est tout à fait nouveau car par le passé, la majorité des découvertes de pétrole concernait de tels gisements (1)

On dénombre en 1980, 30 000 gisements dans le monde : 245 gisements géants et 35 gisements supergéants, soit 73% des réserves, et 29700 petits gisements (réserves initiales inférieures à 0,5 milliards de barils). On a seulement découvert depuis les années 1970, un grand nombre de gisements petits et moyens (jusqu'à 2 milliards de barils) : 178 bassins contiennent des gisements petits ou moyens contre 82 bassins renferment des gisements géants.

Il existe cependant un potentiel pétrolier réel : plus de 900 bassins sédimentaires dont plus de 600 sont riches en possibilités pétrolières. Parmi ces derniers, 27% sont exploités commercialement, 40% sont partiellement explorés, et environ 33% n'ont pas donné lieu à une activité d'exploration notable (2). La mise à jour de nouveaux champs situés offshore et dans des zones recouvertes par les glaces, nécessitera des efforts intenses d'exploration. La plupart des régions à potentiel prometteur sont situées en mer. C'est donc essentiellement l'exploration offshore qui offre les meilleures chances d'augmenter les réserves de pétrole. Ainsi 208 bassins offrent de très bonnes chances de production commerciale et 332 de bonnes chances (3).

Cette évolution du rythme des découvertes est propre à une ressource ancienne, longtemps découverte et exploitée par l'homme. Au contraire, il semblerait que pour une ressource jeune les probabilités de découvertes de nouveaux gisements soient plus élevées et se traduisent par la mise à jour régulière de gisements. C'est le phénomène que l'on peut observer avec le gaz naturel.

Cette ressource qui s'est largement développée dans les années 1960 fait l'objet de prospections importantes qui permettent de découvrir chaque année plus de gaz naturel. On estimait en 1980 que seulement près d'un quart des ressources conventionnelles mondiales étaient découvertes (4). De 1980 à 1986, la croissance des réserves de gaz en Europe de l'Ouest résulte de la

(1) OCDE/AIE, opus cité, p.242-243.

1 baril (unité de volume) vaut 159 litres.

(2) Conférence mondiale de l'énergie, *synthèse des travaux*, 1986, p.210.

(3) Conférence mondiale de l'énergie, opus cité, p.215.

(4) OCDE/AIE, opus cité, p.412.

découverte des gisements de Mer du Nord.

Une autre ressource jeune prospectée depuis seulement une quarantaine d'années est l'uranium. Cependant, depuis quelques années, aucune découverte importante dans une zone nouvelle n'a été annoncée. Il existe encore de grandes zones peu prospectées mais il semble que les grandes provinces minières aient déjà été repérées.

Ainsi, compte tenu de ces diverses observations, on peut penser qu'à l'avenir la réévaluation des ressources fossiles résultera plus de l'accroissement des réserves des gisements découverts que de la découverte de gisements de grande dimension. Compte tenu des technologies de prospections performantes dont on dispose (1), il est peu probable que des zones géographiques susceptibles de receller des gisements conséquents aient échappé à l'oeil humain. P-C DESPRAIRIES exprime cette idée au regard des dotations en pétrole. "La probabilité qu'on trouve un autre Moyen-Orient apparaît désormais très faible sur notre planète dont les 3/4 des bassins sédimentaires ont été reconnus" (2).

Cependant, les progrès relatifs aux technologies d'extraction permettent déjà de trouver des réserves complémentaires dans les formations déjà identifiées. De plus, elles peuvent contenir une teneur et une valeur plus élevées que les quantités initiales. Des gisements plus riches et d'autres d'accès plus difficiles appartenant à des régions déjà explorées peuvent être mis en valeur grâce à l'amélioration des méthodes d'exploitation. L'avancée de l'exploitation pétrolière sous-marine est à ce titre significative. Grâce à la robotisation, il est possible d'accéder à des profondeurs majeures de 300 à 600 mètres (accès économique).

De nouvelles technologies qui sont déjà testées permettront d'augmenter les réserves de pétrole : il s'agit du forage offshore profond et de la récupération assistée. Actuellement, il est possible techniquement d'envisager des profondeurs de 1 500 mètres ; son coût est de l'ordre de 30\$/baril. La récupération assistée ou tertiaire se fait par injection de gaz, de vapeur ou de polymères dans les puits afin d'en extraire plus de pétrole. A l'heure actuelle, la récupération assistée représente moins de 5% de la production pétrolière mondiale. La technologie conventionnelle permet de récupérer 30% du contenu d'un gisement pétrolier. La récupération assistée apporte un gain de l'ordre de 10% (3).

(1) P-H BOURRELIER, R. DIETRICH, opus cité, p.141 et suivantes.

(2) P-C DESPRAIRIES, X. BOY DE LA TOUR? J-J LACOUR, "La mobilisation progressive des ressources pétrolières, facteur de hausse modérée des prix", *Revue de l'énergie*, octobre 1984, p.628.

(3) BENHAMOU G. , "L'or noir du grand bleu", *Science et avenir*, janvier 1990, n°515, p.52.

Le coût de cette technologie varie suivant la nature de l'élément injecté pour améliorer le drainage du pétrole. Selon les estimations de l'IFP présentées à la conférence mondiale de l'énergie en 1986, le coût de la récupération assistée va de 15\$/baril avec l'utilisation de méthodes thermiques jusqu'à 30\$/baril avec l'utilisation de la méthode chimique par injection de tensioactifs. Cependant, compte tenu de l'amélioration des technologies à moyen et long terme, l'offshore profond et la récupération assistée devraient voir leur coût respectif diminuer de 30 à 15 \$/baril pour l'offshore et de 15-30 à 11-15 \$/baril pour la récupération assistée.

La prise en compte successive du rôle des nouvelles découvertes et du rôle des nouvelles technologies de production a permis de relativiser le concept de réserves. Il peut être intéressant maintenant de le rapprocher du rythme de la production et apprécier ainsi le rapport des réserves prouvées relativement à la production. Ce ratio exprime alors le temps nécessaire à l'épuisement des réserves compte tenu de l'intensité de l'activité d'extraction. Nous pouvons rassembler l'ensemble des résultats pour les quatre ressources fossiles ci-dessous.

Ressources	Réserves prouvées R (1er Janvier)	Production P	R/P en années
Pétrole 10 ⁶ tonnes	121 056	2 864	42
Charbon 10 ⁶ tep	1 017 679	2 348	433
Gaz naturel 10 ⁶ tep	88 754	1 568	57
Uranium 10 ³ tonnes	1 555	37	42

Tableau réalisé par l'auteur.

Sources statistiques : Statistiques pétrolières et énergétiques, 1987, Comité Professionnel du Pétrole. Uranium, ressources production et demande, 1988, OCDE.

Les chiffres concernant le pétrole sont relatifs à 1987. Les données pour les autres ressources sont relatives à 1986. Pour l'uranium, les données sont relatives au monde à économie de marché (sauf URSS et CHINE).

On considère que les réserves d'uranium correspondent aux ressources raisonnablement assurées exploitables à moins de 80 \$/kg d'U. Les réserves prouvées sont évaluées au 1er Janvier

de l'année 1987 pour le charbon, le gaz naturel et l'uranium au 1er Janvier 1988 pour le pétrole.

Selon le rythme de la production, l'épuisement des réserves fossiles varie dans le temps. La durée de vie des réserves prouvées de pétrole, par exemple n'a cessé de se modifier sous l'effet des réévaluations de réserves d'une part et du rythme de la production d'autre part. En 1939, elle est estimée à 16 ans seulement.

Depuis 1950, l'évolution est la suivante :

1950	21 ans
1960	40 ans
1970	32 ans
1980	29 ans
1983	34 ans
1987	42 ans

Source : J-M CHEVALIER et al., Economie de l'Energie 1986, p. 28

De 1950 à 1987, le ratio a doublé. Les réserves prouvées ont été multipliées par 11 et la production par 5. Il faut manier ce ratio avec beaucoup de prudence : en effet, il est statique car rattaché à une année de référence et n'exprime pas les déséquilibres relatifs à la production et à consommation mondiales.

Considérant un niveau de réserves et une production de ressource, il est nécessaire de comprendre qui produit et qui consomme la quantité de ressource. Au-delà de considérations purement quantitatives, il faut s'intéresser au développement économique, aux besoins énergétiques qu'il engendre. Au niveau de la production mondiale d'énergie, il existe des différences entre d'une part les pays industrialisés et d'autre part les pays en développement. Si la production mondiale n'a cessé de progresser (+147% sur la période 1960-1986) (1), le rythme selon le développement des pays producteurs est différent : doublement pour les pays industrialisés à économie de marché, triplement pour les pays industrialisés à économie planifiée et les pays en dé

(1) P. RAMAIN, opus cité, p.15-21.

La production d'énergie passe de 2952 à 7291 Mtep.

veloppement sur la période 1960-1986. Du côté de la consommation mondiale d'énergie, les pays industrialisés réduisent fortement leur rythme de croissance annuelle à partir de 1973 : de 5,2% jusqu'en 1973 à 0,5% à partir de 1979. Pour les pays en développement, ces taux sont respectivement de 5,3% à 4,1%. La part des pays industrialisés dans la consommation mondiale régresse de 85% à 77%. La réduction de l'écart relatif à la consommation par tête (de 10 à 1 en 1986 contre 12 à 1 en 1960) traduit le rattrapage des pays en développement. Il faut donc considérer ces décalages et pas seulement l'estimation d'un ratio global.

Certes les réserves sont une mesure de la quantité de ressources que l'homme peut exploiter de manière rentable mais il ne faut pas oublier les disparités relatives au développement des régions du monde. C'est une manière d'apprécier les ressources qualitativement au regard des besoins à satisfaire. Nous verrons par la suite combien cela est important notamment pour tenter de saisir les futurs énergétiques.

De la même manière que nous avons établi un rapport entre les réserves et la production, nous pouvons construire le ratio suivant : Réserves prouvées (1)
consommation

Ressources	Réserves prouvées R	Consommation C	R/C en années
Pétrole 10 ⁶ tonnes	121 056	2 941	41
Charbon 10 ⁶ tep	1 017 679	2 309	441
Gaz naturel 10 ⁶ tep	88 754	1 507	59
Uranium 10 ³ tonnes	1 555	39	40

Tableau élaboré par l'auteur.

(1) A propos des raisons comptables et statistiques sur l'inégalité entre consommation et production mondiales, se référer à P. RAMAIN, opus cité, p.20.

Au rythme de consommation de 1986, les réserves prouvées récupérables représentent une quarantaine d'années pour le pétrole et l'uranium, près de 60 ans pour le gaz naturel et 441 années pour le charbon.

Le concept de réserves que nous avons apprécié à sa juste valeur en considérant d'abord le taux de découverte de nouveaux gisements, la prise en compte de nouvelles technologies et la réévaluation des réserves théoriques qu'elles impliquent, puis les rythmes de la production et de la consommation, n'a pas de signification dans l'absolu. Il apparaît même comme dérisoire compte tenu de la finitude des ressources fossiles. Nous serons amenés à discuter plus loin des limites du concept.

Cependant, nous le considérons comme une unité de mesure, une sorte d'étalon qui posséderait un caractère universel. Il permet de comptabiliser d'un strict point de vue économique les ressources fossiles dont dispose l'humanité. Nous allons à présent nous intéresser aux ressources renouvelables et tenter une approche quantitative en recourant au concept de réserve largement utilisé ici.

B. Les ressources renouvelables

Le passage de la notion de ressource à celle de réserve présente quelques difficultés du fait des caractéristiques particulières des ressources renouvelables. Elles ne se présentent pas sous forme de gisement dont on peut programmer l'exploitation. L'énergie solaire et l'énergie éolienne ne sont guère stockables dans l'état actuel des techniques. Elles ne peuvent donc être utilisées que quand le soleil brille ou le vent souffle. De plus, les ressources renouvelables sont diluées dans l'espace et sont difficiles à transporter. L'énergie hydraulique par exemple est plus concentrée mais n'est pas stockable sur des périodes de plusieurs mois.

Il y a une grande diversité dans le degré de dilution spatiale et aussi temporelle de l'ensemble des ressources renouvelables : l'énergie hydraulique et le bois sont plus facilement stockables et sont plus concentrés que l'énergie solaire et l'énergie éolienne. A l'inverse des ressources fossiles, elles sont mieux réparties sur la surface du globe.

Compte tenu de ces précisions, on peut évaluer les ressources en terme de connaissance dans l'espace dans le temps des flux d'énergie renouvelable. Cela est cependant insuffisant pour apprécier le concept de réserve.

Dans le cas des ressources renouvelables, la notion de réserve doit aussi être comprise selon l'expression de B. DESSUS comme "potentialité d'usage de ces énergies" (1).

Il cite l'exemple de la ressource éolienne située au Groenland : tandis que son potentiel est énorme (il équivaut à une production supérieure à 5 000 kwh par an et par kw installé), elle représente une réserve énergétique à peu près nulle à cause de la très faible densité de population (2). Cette situation peut naturellement évoluer avec la technologie. Si, par exemple, une technologie permet le stockage et le transport de l'électricité produite par les éoliennes sur de grandes distances, la réserve éolienne du Groenland devra alors être évaluée (3). On remarque ici la parfaite analogie de sa démarche avec celle des pétroliers qui réévaluent les réserves en fonction de l'évolution des technologies et des coûts.

Nous nous référerons aux travaux de B. DESSUS déjà cités pour connaître les réserves renouvelables et leur localisation géographique. L'évaluation des réserves renouvelables d'énergie tient compte ainsi non seulement des ressources physiques et des conditions technico-économiques, mais aussi de la proximité des populations qui peuvent y recourir. Compte tenu de l'état actuel des technologies, les ressources renouvelables peuvent difficilement être transportées.

Il apparaît dès lors tout à fait juste de les apprécier en fonction de la présence d'activités consommatrices suffisamment proches. Dans le cas de ressources fortement diluées comme les énergies éolienne et solaire, cette liaison avec la proximité d'une demande locale et des besoins qu'elle génère sera plus forte que pour des ressources telles la biomasse et l'énergie hydraulique (grands barrages).

Retenant des critères pertinents, B. DESSUS est parvenu à approcher les réserves mondiales renouvelables à partir de données sur les ressources, les technologies et les possibilités d'usage. L'estimation des réserves issue de ses travaux est résumée dans le tableau suivant et concerne les ressources en bois, hydraulique, soleil et vent pour l'année 1990. Loin de constituer des ressources marginales, la totalité de ces réserves représente plus de la moitié de la consommation mondiale d'énergie en 1990.

(1) B. DESSUS, *Ressources et réserves d'énergie renouvelable : tentative d'approche cartographique*, 1989, CNRS/PIRSEM, p.2.

(2) B. DESSUS, "Les promesses des énergies renouvelables", *La Recherche*, n°214, octobre 1989, p.1286.

(3) B. DESSUS imagine que l'on peut recourir à des câbles supraconducteurs, ou encore à la fabrication d'hydrogène par électrolyse et à son transport par gazoduc pour véhiculer l'électricité produite.

Réserves renouvelables

Mtep	Bois	Hydraulique	Solaire	Eolienne
Pays développés	878	541	33	50.5
Pays en développement	3 357	974	282	15
Total monde	4 235	1 515	316	65

Source : B. DESSUS, ressources et réserves d'énergie renouvelables, 1989, CNRS/PIRSEM

Les réserves renouvelables totales s'élèvent à 6 131 Mtep. Le bois constitue à lui seul 69% des réserves. L'énergie hydraulique vient en seconde position avec 25% des réserves totales, suivie de l'énergie solaire (5%) et de l'énergie éolienne (1%). Les pays développés disposent du quart des réserves totales. L'énorme potentiel des réserves est situé dans les pays en développement. L'hémisphère sud contient ainsi 70% des réserves renouvelables.

Les réserves de bois sont dispersées géographiquement mais les 3/4 sont situées dans cinq pays : Le Brésil (28%), l'Afrique Noire (17%), l'Amérique Latine (11%), l'URSS (10%) et l'Asie Océanie (9%).

Une répartition similaire s'observe pour l'énergie hydraulique : 71% des réserves sont situées dans six pays : l'Afrique Noire (20%), la Chine et l'URSS avec 13% chacun, l'Amérique Latine et l'Asie-Océanie avec 9% chacun et le Canada (7%). Concernant l'énergie solaire, la moitié des réserves se concentre dans trois pays : l'Inde et l'Asie-Océanie avec chacun 18%, et la Chine avec 16% des réserves totales. Des quantités utilisables plus modestes de bois ou d'énergie hydraulique s'adressent largement aux pays du Sud.

Les pays développés occupent une place prépondérante pour l'énergie éolienne avec les trois quarts des réserves. Trois régions recèlent plus de la moitié des réserves : l'Europe de la CEE et l'Europe du Nord (42%), et les USA (14%). La détermination de ces réserves repose sur un certain nombre d'hypothèses technico-économiques faites par l'auteur.

L'approche quantitative et cartographique des ressources renouvelables relative à l'année 1990 est susceptible d'être modifiée du fait de l'évolution des techniques, des conditions économiques et des usages énergétiques.

Concernant le bois, la réserve a été déterminée à partir d'une description des surfaces forestières de chaque région du globe et d'une évaluation de la productivité annuelle de chaque type de forêt supposé en exploitation. Les forêts couvrent une surface de 4 100 millions d'hectares. La productivité est variable selon les différents types de forêts. Ainsi, les productivités primaires varient de 2 à 20 tonnes de matière sèche par ha et par an, les productivités récoltables de 1 à 8 tonnes par ha et par an. Ce sont là des valeurs moyennes. La production annuellement récoltable de bois compte tenu de la productivité propre à chaque type de forêt s'élève à 14 580 millions de TMS/an (1). Il s'agit là de la ressource en bois. Pour passer à la réserve en bois, il convient de tenir compte de la compétition entre les usages matériaux et énergétiques, ainsi que des difficultés d'accès région par région. L'hypothèse retenue considère que les usages du bois autres qu'énergétiques peuvent représenter 30 à 50% de la production selon que le pays est en développement ou bien industrialisé. Si l'on retient les seuls usages énergétiques, la réserve en bois s'établit ainsi à 4 235 millions de Tep.

Pour la ressource d'énergie solaire, la donnée de base est constituée par la carte mondiale de la somme du rayonnement global annuel (en $\text{kwh/m}^2/\text{an}$). Elle représente la quantité d'énergie solaire reçue en une année par m^2 de surface au sol. Cette donnée permet d'établir une carte de la disponibilité annuelle de l'énergie solaire par unité de puissance installée d'une unité de transformation. Elle est exprimée en kwh par kw crête ; la puissance crête représente la puissance obtenue pour l'ensoleillement maximal. Les quantités d'énergie recensées sont considérables (2). La densité de flux solaire reçue à la surface terrestre est relativement faible : de 1700 à 3 000 $\text{kwh/m}^2/\text{an}$.

Pour apprécier les réserves solaires, des hypothèses de diffusion des usages sont posées. Trois types d'utilisation sont retenus : un usage thermique avec les capteurs solaires pour le chauffage de l'eau, et deux usages électriques avec la conversion photovoltaïque ou thermodynamique (usage décentralisé et sur réseau électrique). Ces utilisations concernent des régions dotées d'un ensoleillement important (supérieur ou égal à 1300 $\text{kwh/m}^2/\text{an}$). L'usage thermique avec les capteurs solaires ainsi que la fourniture d'électricité décentralisée avec les photopiles (non reliée à un réseau) se réfèrent à des zones essentiellement rurales. Les capteurs et les photopiles ont des caractéristiques semblables : leur surface notamment est limitée à 1 m^2 en moyenne par habitant. La réserve solaire thermique estimée, compte tenu de ces critères et de la population potentielle concernée par cette application, est de l'ordre de 167 millions de tep en 1990. Plus de 35% de la population mondiale, dont 90% dans les pays en développement, constitue un énorme potentiel.

(1) En tonne de matière sèche. Cela représente 6561 millions de tep par an.

Les réserves solaires utilisables pour les besoins d'électrification décentralisée s'élèvent à 452 Twh, soit 99 millions de tep en 1990. Elles sont exclusivement concentrées dans les pays en développement (99%).

il est possible d'envisager une démarche inverse avec une troisième utilisation concernant la fourniture d'électricité solaire sur un réseau électrique existant. Cet usage concerne aussi des régions très ensoleillées. Il s'agit d'apporter un complément au sein d'installations centralisées (centrales photovoltaïques ou thermodynamiques solaires) à un niveau correspondant à la pointe de consommation des mois les plus chauds. Afin de dimensionner ces installations, l'évaluation s'appuie sur l'analogie avec l'exemple de trois états du Sud des Etats-Unis (Californie, Texas et Nouveau Mexique). La réserve en électricité de réseau s'élève à 230 Twh, soit 50,6 millions de tep.

L'analyse de la ressource éolienne se fait à partir de la carte mondiale de la disponibilité annuelle d'énergie éolienne exprimée en kwh par kw de puissance installée d'une unité de transformation dans un lieu donné. Elle nous montre, la diversité des situations dans le monde. Le potentiel le plus élevé est situé dans l'hémisphère Nord. Des quantités considérables d'énergie sont estimées en considérant un seuil minimum de 3 000 kwh/kw/an à l'implantation d'éoliennes et une utilisation de la ressource par les machines installées de 50%.

Afin de délimiter les réserves éoliennes, deux sortes d'utilisations ont été envisagées : les besoins ruraux et les besoins sur le réseau électrique. Les besoins ruraux sont estimés à 1 000 kwh/habitant. La réserve renouvelable pour cet usage est de 23,7 Twh, soit 5,2 millions de tep. Pour estimer les besoins sur le réseau, on se réfère à une installation située dans l'hémisphère Nord destinée à fournir de l'énergie de pointe d'hiver. Des éoliennes de puissance moyenne 200 kw vont satisfaire un besoin de 2 Twh en France par exemple. Dans les pays du Sud concernés (Côte est du Brésil et de l'Argentine...) on suppose que l'énergie éolienne qui se déverse sur le réseau ne peut dépasser 10% de la consommation annuelle de la zone retenue. L'énergie annuelle produite totale permettant de satisfaire les besoins sur le réseau dans ces conditions s'élève à 256 Twh, soit 56,32 millions de tep.

Concernant l'énergie hydraulique, les ressources sont mieux connues que celles de bois, de vent ou de soleil. La ressource potentielle théorique est de l'ordre de 80 000 Twhpar an. Cependant, la ressource potentielle techniquement exploitable n'est que de 10 000 Twh/an. Les réserves hydrauliques ou potentiel hydraulique économique sont estimées en général à des valeurs comprise entre 65 et 80% de la ressource..

Compte tenu d'une grande diversité des installations (1) (type, taille), on considère que 70% de la ressource constitue la réserve sauf dans les cas où l'équipement déjà réalisé dépasse cette valeur. La réserve hydraulique s'élève à 6 877 Twh/an, soit plus de 3 fois la production de 1987 qui était de 2 059 Twh.

L'ensemble des réserves renouvelables estimé à partir de ces hypothèses constitue un apport non négligeable pour de nombreux pays. Les usages les plus décentralisés de ces réserves comme le bois, la photovoltaïque, le micro-hydraulique ou le microéolien peuvent satisfaire les besoins des zones rurales des pays en développement dans la mesure où ils constituent des solutions moins coûteuses (investissement mais aussi coûts de fonctionnement) adaptées aux conditions locales (faible densité de population, faible consommation annuelle par habitant).

Cependant, il faut noter que l'abondance de certaines réserves peut être remise en cause compte tenu d'une exploitation abusive. Le cas du bois est à ce titre révélateur. Tandis que la réserve de bois peut être dans certains pays exploitée sans déforestation (Canada, URSS notamment) dans d'autres régions du monde elle est menacée. La crise du bois de feu sévit dans des régions en développement où localement des situations de pénurie apparaissent (2). On déboise plus de 10 millions d'hectares chaque année mais seulement un million d'hectares est replanté. L'exemple de la Chine illustre le phénomène de déforestation qui résulte d'une surexploitation (3).

De 1950 à 1980, 20 millions d'hectares de forêt ont été abattus, soit un quart de la couverture forestière afin de répondre aux besoins en bois de feu et en combustibles ainsi qu'accroître les zones de culture. Le résultat est là : la couverture forestière de la Chine n'est que de 12% contre 33% en moyenne pour l'ensemble du monde aujourd'hui. De même, en Inde, en Afrique Noire ou au Brésil, on peut observer une forte pression exercée sur le patrimoine forestier par l'augmentation de la population et l'accroissement des besoins qui en découle.

Après avoir examiné les réserves de bois, d'énergie solaire, d'énergie éolienne et d'énergie hydraulique en tenant compte de leur usage potentiel et des conditions économiques d'exploitation, il apparaît que nous n'avons pas étudié toutes les ressources renouvelables : la géothermie, l'énergie des vagues, l'énergie marémotrice et la biomasse (sauf le bois) n'ont pas été évaluées jusqu'ici.

Nous allons compléter à présent le panorama des ressources renouvelables avant de proposer une synthèse sur les ressources énergétiques de la planète.

(1) Selon l'IEPE, la réserve mondiale d'énergie des petites installations s'élève à près de 500 Twh en 1988. Il s'agit là de microcentrales de quelques kw. Cité dans B. DESSUS, opus cité, p.27.

(2) CNRS/CPE, *Atlas mondial de l'énergie*, Aditech, 1989, p.30.

(3) J. THEYS, "L'environnement et les ressources au 21ème siècle", *Futuribles*, nov. 1987, p.11.

La géothermie est l'énergie thermique contenue dans les roches et les fluides à l'intérieur de la terre. Les ressources géothermiques sont classées en fonction des propriétés thermodynamiques du fluide extrait. On distingue ainsi les systèmes à basse température (< 90°C les systèmes à température modérée (90-150°C) et les systèmes à haute température (>150°C).

Ces trois types de système permettent de répondre à deux besoins :

- les systèmes à température basse et modérée - géothermie basse énergie et géothermie moyenne énergie - sont utilisés pour obtenir directement de la chaleur

- les systèmes à haute température - géothermie haute énergie - sont essentiellement utilisés pour la production d'électricité

La répartition des ressources géothermiques dans le monde est inégale (1). Les ceintures géothermiques sont associées aux frontières des neuf plaques de la croûte terrestre - plaques tectoniques - et sont surtout localisées dans des régions d'activité volcanique récente, ou bien dans des endroits où la croûte s'est amincie. Des gisements de haute température existent dans des zones où des tremblements de terre, un volcanisme récent, des sources chaudes ou encore des geysers sont présents. La croûte terrestre est aussi chaude dans des chaînes de montagnes au milieu des océans (Islande par exemple) que dans des fossés tectoniques à l'intérieur des continents (fossé est-africain par exemple).

Il existe 4 types de ressources géothermiques (2) : les ressources hydrothermiques, les ressources géopressurisées, les roches chaudes et sèches, et le magma. A l'heure actuelle, seules les ressources hydrothermiques font l'objet d'une exploitation commerciale ; les techniques permettant d'exploiter les autres ressources sont encore au stade de la recherche.

Les ressources hydrothermiques contiennent de l'eau chaude et/ou la vapeur localisées dans des roches à des profondeurs (de 100 mètres à 4 500 mètres). Les températures des réserves hydrothermiques sont comprises entre 90° C et plus de 350° C ; les 2/3 environ de ces réserves ont des températures comprises entre 150° C-200° C.

Les réserves de haute qualité contiennent de la vapeur (gisements à vapeur dominante) qui induit quasiment aucun fluide. On a localisé dans le monde 2 réserves de vapeur sèche : l'une à Larderello en Italie et l'autre dans le champ des geysers aux États-Unis. Ces deux gisements permettent de satisfaire des besoins en électricité.

(1) OCDE/AIE, Sources d'énergie renouvelables, 1987, p.268.

(2) Pour une définition précise des ressources, se référer à OCDE/AIE, opus cité, p.269 et suivantes.

Il est possible d'apprécier la réserve hydrothermique en tenant compte des usages de chaleur directe et d'électricité (1). La chaleur géothermique est utilisée directement dans de bonnes conditions économiques pour de nombreuses applications.

En 1985, la puissance installée dans le monde à des fins d'utilisation directe de l'énergie géothermique s'élevait à 7 100 Mw. L'énergie fournie correspondante a représenté 24 000 Gwh, soit 5,28 millions de tep (2). En 1975, la puissance installée était de l'ordre de 3 100 Mw. La capacité installée s'est accrue sur la décennie écoulée au rythme de 8,5% par an. Cette production a permis de satisfaire les besoins en chauffage urbain (domestique et industriel), en chauffage des serres ainsi que les besoins de thermalisme.

La chaleur directe est aussi utilisée dans l'aquaculture (Japon), dans la climatisation des locaux (Nouvelle Zélande) ou encore dans de nombreux procédés industriels (Etats-Unis).(3) Six pays concentrent plus de 80% de l'énergie produite. Par ordre croissant d'importance : l'Italie, la Nouvelle Zélande, la Chine, la Hongrie, l'Islande et le Japon.

Du côté de la production d'électricité hydrothermique, elle est assurée de façon commerciale dans 15 pays et les technologies de conversion (centrales à vapeur sèche et centrale à vapeur détendue) sont parfaitement maîtrisées. De 1975 à 1985, elle a été multipliée par 7 .

Dans le monde, la puissance électrique géothermique installée représentait, en 1986, 5 500 MW, contre 4 800 en 1985 (+15%). Depuis 1970, le taux de croissance annuel de la capacité de production d'électricité d'origine géothermique s'est élevé à 16,5% par an. Quatre pays disposent de 85% de la puissance installée totale en 1985. Le premier, les Etats-Unis, dispose d'une puissance installée de 2 000 MW avec 56 centrales. Après les Etats-Unis, les Philippines détiennent 894 MW suivis du Mexique et de l'Italie avec respectivement 645 et 520 MW.

Ces données ne concernent que l'utilisation de l'énergie issue des ressources hydrothermiques. Elles sont susceptibles d'évoluer avec les progrès techniques et une meilleure évaluation des gisements. ;Selon une estimation de l'OCDE (4), 10% environ de l'ensemble des terres du monde renferment des ressources hydrogéothermiques accessibles qui, en théorie, pourraient fournir des centaines de milliers de mégawatts pendant plusieurs décennies.

(1) OCDE/AIE, opus cité, p.283 et suivantes.

(2) L'estimation en tep suppose que pour produire 1 Twh d'électricité il faut 0,22 Mtep de combustible.

(3) AIE/OCDE, opus cité, p.275.

(4) AIE/OCDE, opus cité, p.267.

Le potentiel géothermique demeure aujourd'hui mal connu. L'utilisation des ressources géopresurisées, des roches chaudes et sèches ou du magma compte tenu d'importants progrès techniques permettra une réévaluation de ce potentiel.

On peut d'ores et déjà estimer que la géothermie haute énergie autorise une production de 500 à 5 000 Twh d'électricité par an, et cela pour l'ensemble du monde (1). Cela correspond à une production annuelle en tep de 110 à 1110. Cette estimation est à considérer avec prudence car elle s'appuie sur les gisements probables de géothermie haute énergie et sur une exploration plus intense dans des régions comme l'Amérique Latine, l'Afrique et l'Asie.

Comme pour toute autre ressource renouvelable, le potentiel économique de la géothermie est très spécifique selon la localisation géographique. Là où elles se présentent, elles offrent la possibilité de répondre aux besoins énergétiques d'une région pendant de nombreuses années.

L'étude du potentiel en biomasse révèle une grande diversité des ressources. On définit la biomasse comme l'ensemble des matières issues du processus de photosynthèse des plantes. Elle comprend de grandes quantités d'espèces végétales, terrestres et aquatiques, les résidus agricoles et industriels, les déchets de transformation, les eaux usées et les déchets d'élevage. La ressource essentielle est donc le carbone fixé de manière renouvelable par le processus de photosynthèse. Ces ressources sont abondantes : 170 milliards de tonnes de biomasse sèche sont produites dans le monde chaque année (2).

Cependant, l'ensemble de cette production n'est pas destinée en totalité à la satisfaction de besoins énergétiques mondiaux. Les ressources de la biomasse utilisées à des fins énergétiques peuvent se subdiviser en trois catégories : les ressources ligneuses, les résidus agricoles et les déchets animaux, et les cultures énergétiques.

Nous nous intéressons ici aux deux dernières ressources énoncées, la première ayant déjà été étudiée. Les résidus de cultures et les déchets d'élevage constituent un sous-produit important du secteur agricole de la production alimentaire. Le potentiel énergétique récupérable représenterait en moyenne un quart de la production énergétique des résidus et déchets agricoles sur la période 1978-79-80.(3) Cette donnée concerne seulement les pays membres de l'Agence Internationale de l'Energie.

(1) CNRS/CPE, Atlas mondial de l'énergie, Aditech, 1989, p.28.

(2) Soit environ 76,5 milliards de tep.

(3) AIE/OCDE, Sources d'énergie renouvelables, 1987, d'après données du tableau de la page 20.

La ressource constituée par la culture de la biomasse a fait l'objet d'évaluation dans un certain nombre de pays. Cependant, compte tenu de la diversité des ressources de la biomasse, il est difficile de faire une évaluation définitive de leur potentiel énergétique aujourd'hui. Il existe plusieurs procédés de conversion de la biomasse en chaleur ou en combustibles mais toutes les technologies ne sont pas au même stade d'avancement. Les technologies relatives aux procédés de conversion que sont la combustion directe et la conversion biochimique(1) sont opérationnelles. Par contre, la gazéification de la biomasse -en particulier la conversion de matières lignocellulosiques en éthanol - fait l'objet de recherches intenses.

Les ressources de biomasse peuvent ainsi couvrir des besoins énergétiques dans plusieurs applications majeures : la production de chaleur destinée à des procédés industriels et au chauffage résidentiel, la production de carburants pour les transports (2) et de combustibles pour la production d'électricité.

Nous constatons que les réserves de biomasse sont mal évaluées -excepté le bois- tandis que les besoins qu'elles pourraient satisfaire plus largement sont nombreux. La même constatation s'impose quand nous observons ce qu'il en est aujourd'hui des ressources relatives à l'énergie des vagues, l'énergie marémotrice et à l'énergie thermique des océans. L'ensemble de ces ressources permettrait de satisfaire le besoin en électricité dans de nombreuses régions du monde. Cependant, peu de réalisations de grande taille ont vu le jour pour des raisons de coûts trop élevés. Elles relèvent donc d'applications souvent marginales.

Concernant l'énergie des vagues, les ressources disponibles sont concentrées entre les latitudes 40° et 60° des deux hémisphères compte tenu de la puissance des vents. Il est difficile d'évaluer le potentiel électrique au stade des recherches actuelles : les systèmes ne sont pas viables économiquement et les rendements des technologies doivent être améliorés. Quatre pays poursuivent des recherches notables : le Japon, la Norvège, la Suède et le Royaume-Uni. A l'exception des petits systèmes utilisés dans les aides de navigation et de deux petites centrales électriques en Norvège, les systèmes de conversion de l'énergie des vagues n'ont pas été commercialisés.

Du côté de l'énergie marémotrice, les lourds investissements nécessaires à la construction des centrales marémotrices et le nombre limité de sites appropriés à leur exploitation traduisent le petit nombre de systèmes d'exploitation de cette énergie aujourd'hui en service dans le monde.

(1) La conversion biochimique fait intervenir deux méthodes techniques : la digestion anaérobie et la fermentation par hydrolyse.

(2) A propos des biocarburants se référer à P-H BOURRELIER et R. DIETHRICH, opus cité, p.134.

Les plus grandes centrales marémotrices se situent en France, au Canada et en Chine. Seule l'usine de la Rance est une installation exploitée commercialement ; les autres systèmes existants sont en effet des installations pilotes.

La technologie de l'énergie marémotrice est relativement mûre et les coûts sont le plus souvent déterminés par le lieu d'implantation de la centrale. L'usine de la Rance a permis de démontrer la viabilité économique pour un site particulier. Les ressources disponibles sont fortement dépendantes de l'amplitude des marées, d'où un faible nombre de sites propices à l'implantation d'une centrale marémotrice (une dizaine environ dans le monde) (1). L'ensemble de ces sites est localisé dans l'hémisphère Nord.

Les ressources en énergie thermique sont localisées dans les régions tropicales et subtropicales. Bon nombre de régions favorables à l'implantation de centrales thermo-océaniques (gradient égal à 20°C minimum) sont situées dans les pays en développement (2). De tels pays pourraient satisfaire leur besoin en électricité en substituant l'énergie thermique au pétrole. De plus, deux sous-produits des systèmes destinés à convertir l'énergie thermique peuvent accroître la rentabilité de la production d'énergie. Il s'agit de l'aquaculture et de la production d'eau douce. Par ailleurs, la conversion de l'énergie thermique des mers présente l'avantage de permettre une production d'énergie électrique de manière continue.

Aujourd'hui, les recherches en sont au stade de la mise au point de centrales prototypes ; elles se poursuivent afin d'améliorer les composants et les matériaux. Il n'est donc pas possible de dresser un bilan chiffré sur les ressources en énergie thermique. Le même constat s'impose pour les ressources en énergie marémotrice et en énergie des vagues. Il s'agit d'"énergies prototypes" qui nécessitent de nombreuses recherches encore afin de mettre au point des technologies d'exploitation appropriées aux ressources. Le cas de l'énergie marémotrice est de ce point de vue à part ; cependant, les applications de son potentiel sont très limitées car elles exigent une hauteur de marée minimale de cinq mètres, ce qui concerne peu de sites dans le monde.

Du côté de la géothermie, nous avons constaté que de nombreux sites à moyenne et haute température font l'objet d'une exploitation commerciale. Le gros handicap dans l'évaluation des réserves géothermiques demeure les imprécisions sur les réservoirs - faiblesse des techniques

(1) AIE/OCDE, opus cité, p.308.

(2) Conférence mondiale de l'énergie, opus cité, p.380.

d'évaluation-. De plus, il existe des différences de qualité et de nature de la ressource géothermique d'un gisement à un autre. Des recherches destinées à élaborer des modèles de prévision de la capacité de production des réservoirs sont en cours ; des techniques de prospection plus performantes sont également en cours d'élaboration. Enfin, concernant la biomasse (à l'exclusion du bois) il est difficile d'évaluer la réserve du fait de l'absence de données suffisantes au niveau mondial.

Le patrimoine énergétique planétaire est donc riche en gisements fossiles et en flux renouvelables dont une partie seulement est accessible à l'homme. Sa pérennité est étroitement liée aux activités humaines. Jusqu'à présent, sa composante non renouvelable a été plus fortement exploitée et mise au valeur grâce au progrès technique conjointement à la découverte de gisements nouveaux. Compte tenu de l'évolution démographique, de l'accession à des stades de développement plus avancés pour les pays en développement et de la nécessité d'accroître la production énergétique qui en résulte, nous allons tenter d'appréhender les perspectives énergétiques pour le siècle prochain.

L'évolution des besoins, leur changement de nature, leur accroissement, vont jouer un rôle majeur dans l'affectation des ressources énergétiques à venir. Cette affectation spatiale et temporelle fera l'objet d'une attention particulière dans la mesure où elle façonne les contours du patrimoine énergétique et assure la diversité de sa composition.

§ 2 - Perspectives énergétiques pour le 21ème siècle

Ces perspectives sont étroitement liées à l'évolution de la consommation énergétique future ainsi qu'au rythme d'extraction, au taux de découverte ou encore aux progrès techniques. De même, elles sont guidées par des considérations démographiques qui traduisent des niveaux hétérogènes de développement économique.

Afin d'éclairer l'horizon énergétique de moyen et long terme, nous allons présenter et discuter les principaux résultats issus des travaux de J.R FRISCH lors de la conférence mondiale de l'énergie en 1986 (1). D'autres études ont cependant été réalisées. (2) Nous avons retenue l'approche de J-R FRISCH car elle se situe dans une position médiane dans les estimations relatives aux consommations énergétiques par rapport aux autres études disponibles.

L'étude compare les projections de consommations énergétiques cumulées aux ressources disponibles. Par définition, lorsque la demande cumulée d'une source d'énergie épuise les réserves correspondantes au cours d'une période donnée, il y a alors tension. Les quatre périodes retenues sont : 1985 - 2000, 2000 - 2020, 2020 - 2040 et 2040 - 2060. Les ressources énergétiques étudiées sont les combustibles minéraux solides, le pétrole, le gaz naturel et l'uranium, ainsi que l'hydraulique, les énergies nouvelles (fusion solaire) et les énergies non commerciales (3).

Trois projections relatives à la demande d'énergie sont réalisées. Une première variante (notée H) correspond à un prélèvement intense sur les ressources (4). Une seconde (notée C) ou hypothèse centrale correspond à une croissance soutenue de la consommation mondiale (5). Cette variante, compte tenu du ralentissement sensible de la demande depuis 1980, est plus vraisemblable que l'hypothèse haute " H ".

(1) J-R FRISCH, *Abondance énergétique, mythe ou réalité ? Le projet ATRE*, Technip, 1986.

(2) Pour une comparaison originale, se reporter à J-M MARTIN, *L'économie mondiale de l'énergie*, 1990, p.96-99. L'auteur souligne notamment les divergences entre les scénarios énergétiques générées par la prise en compte d'hypothèses différentes sur l'évolution des consommations d'énergie par habitant. Le rôle essentiel de l'évolution du ratio consommation d'énergie primaire sur population ne peut être ignoré. ($E/POP = PIB/POP \times E/PIB$).

(3) Bois de feu, résidus végétaux et animaux.

(4) Taux de croissance de la consommation mondiale : 1980-2020 : 2,4% et 2020-2060 : 1,35%.

(5) 1980-2020 : 1,75% et 2020-2060 : 0,8%.

Une troisième hypothèse (notée Z) associée à la " croissance zéro " correspond au maintien de la structure et du niveau de consommation de 1980. Cette dernière variante demeure dans l'étude secondaire. Les projections de consommation appellent plusieurs remarques. Tout d'abord, les résultats obtenus masquent des écarts importants entre les différentes régions du monde. Ainsi, la consommation d'énergie primaire d'un habitant du Nord passerait entre 1980 et 2060 de 4,6 à 7,1 tep tandis que celle d'un habitant du Sud progresserait de 0,6 à 1,1 tep dans les scénario central C.

Les perspectives démographiques et les données concernant la consommation font apparaître la persistance dans le long terme d'une dualité importante : les pays industrialisés ont une consommation par tête élevée et leur population stagne d'un côté, et les pays en développement ont un potentiel d'accroissement de consommation énorme par habitant et une croissance démographique très rapide d'un autre côté.

La population des pays industrialisés représente en 1960 le tiers de la population mondiale. De 1980 à 2060, elle va progresser de 1,2 à 1,7 milliards d'habitants ; en 1980, elle ne représente plus qu'un quart de la population mondiale et en 2060 seulement 17 %. L'évolution de la population est donc caractérisée par une stabilité quasi constante depuis 1980.

Le tiers monde, lui, progresse de ce point de vue beaucoup plus rapidement : 3,2 milliards d'habitants en 1980, 8 milliards en 2060. Il représente les 4/5 de la population mondiale en 2060. En un siècle, (de 1960 à 2060) la population du tiers monde serait ainsi multipliée par 4.

Si l'on observe maintenant la consommation d'énergie des pays industrialisés et du tiers monde, alors qu'un habitant de la planète sur 3 appartient à un pays développé, il consomme les trois quarts de l'énergie primaire mondiale (en 1980). En 2060, cette répartition devrait être sensiblement modifiée : les pays industrialisés (1 habitant sur 5 de la planète) devraient consommer 57 % de l'énergie primaire mondiale ; le reste étant consommé par le tiers monde, soit les 4/5 de la population mondiale. (hypothèse centrale)

Au niveau mondial, la consommation d'énergie primaire par habitant et par tep qui s'établit à 1,7 en 1980, serait de 2,1 en 2060 selon l'hypothèse centrale contre 3,5 selon l'hypothèse haute. Naturellement, ces évolutions dépendent des projections de population ainsi que des projections de consommation à long terme. Globalement, la population va plus

que doubler sur la période 1980 - 2060 pour s'établir à 9,7 milliards d'habitants en fin d'horizon. Dans ces conditions, elle aura plus que triplé en un siècle ! (1)

Du côté de la consommation primaire mondiale, elle est multipliée par trois de 1980 à 2060 (par 6 de 1960 à 2060) : de 7,5 Gtep en 1980, elle s'établit à 21 Gtep en 2060 (hypothèse centrale).

Les figures 1 et 2 illustrent pour l'ensemble du monde les projections de consommations globale et par habitant.

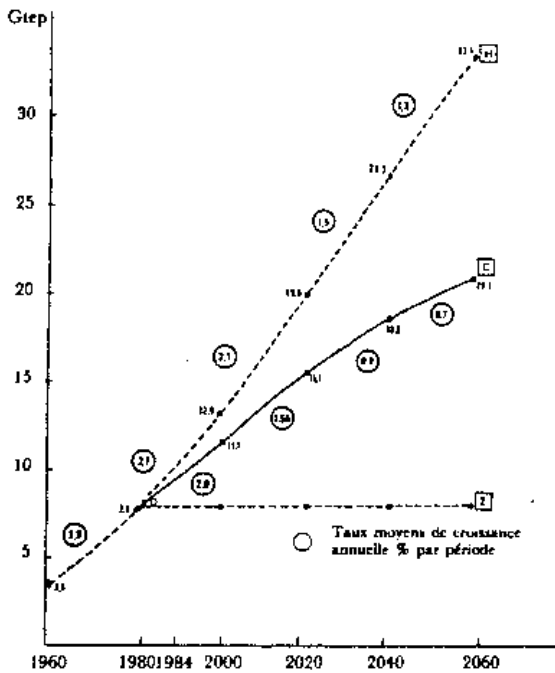


Figure 1: Projections de la consommation mondiale d'énergie primaire.

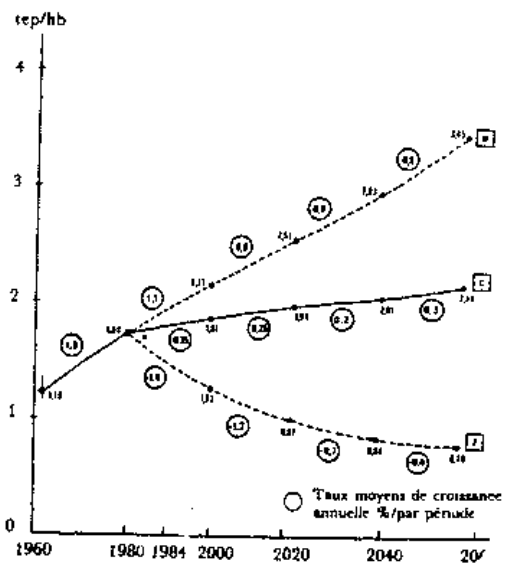


Figure 2: Projections de la consommation par habitant.

Source : Conférence mondiale de l'énergie, Synthèse des travaux, 1986, p. 340.

(1) D'après les données issues de J-R FRISCH, opus cité. En 1960, la population mondiale compte 3 milliards d'habitants contre 9,7 en 2060.

On peut observer une inflexion constante à la baisse des taux de croissance moyens annuels de la demande mondiale de 1960 à 2060 et cela sur chacune des trajectoires. De 3,9 % entre 1960 et 1980, ils s'établissent à 1,2 - 0,7 entre 2040 et 2060.

Sur la figure 2, on constate une certaine stabilisation des taux de croissance. En " H ", de 1,9 % sur la période 1960 - 1980, ils passent à 1,1 % en 1980 - 2000 pour s'établir autour de 0,80% en 2040 - 2060. En " C ", ils se situent autour de 0,35 % jusqu'en 2020 pour finalement se localiser à 0,3 % sur la dernière période.

L'examen enfin des consommations cumulées correspondant aux différentes hypothèses (cumul depuis 1985) révèle un véritable défi à relever pour le moyen et long terme.

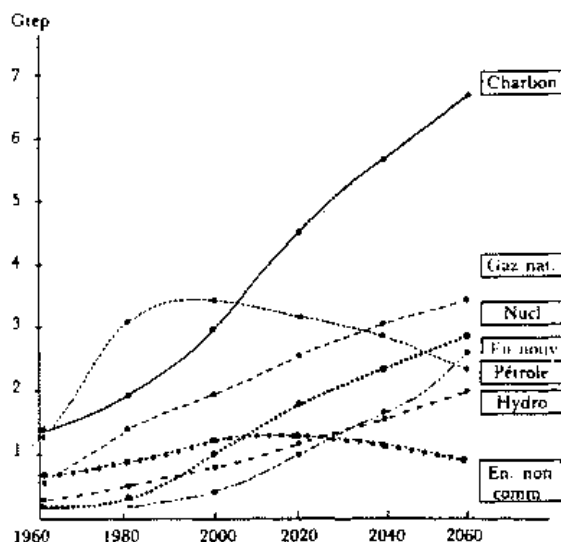
D'ici 2060, la consommation mondiale s'élèverait à 1551 Gtep dans le cas " H ", 1143 Gtep en " C " et 587 Gtep en " Z ". Or de 1960 à 1985, 140 Gtep ont été consommés. Il faudra donc fournir 11 fois la quantité d'énergie consommée depuis 1960 dans l'hypothèse H ; 8 fois dans l'hypothèse C et 4 fois dans l'hypothèse Z de "croissance zéro ". La variante C est la plus vraisemblable. Sur cette trajectoire, les ressources renouvelables représentent 245 Gtep soit 21 % du total à l'échéance 2060 ; leur part est de 17 % en 2000. Elles occuperaient donc une place toute relative : parmi elles, l'énergie hydraulique et les énergies nouvelles émergent tandis que les énergies non commerciales simultanément déclinent. Le cumul des consommations de ressources non renouvelables atteint 900 Gtep d'ici 2060 (contre 105 Gtep de 1960 à 1985). Les combustibles fossiles représentent la plus grande partie avec 770 Gtep ; 190 Gtep pour le gaz naturel, 350 Gtep pour le charbon et 230 Gtep pour le pétrole. Dans le même temps, la structure des approvisionnements au niveau mondial va donc être modifiée.

A côté de l'émergence de sources nouvelles en fin de période et du déclin des énergies non commerciales, l'évolution des approvisionnements se caractérisait par un développement rapide des combustibles solides et plus soutenu du gaz naturel, de l'énergie nucléaire et de l'énergie hydraulique.

L'évolution traduit l'essor considérable du charbon à partir de la période 2000 - 2020 pour aboutir à niveau de consommation de 7 Gtep en " C " en 2060. Il apparaît ainsi comme l'énergie principale de la première moitié du 21e siècle (environ 35 % de la consommation mondiale en 2060). Selon la trajectoire " C ", le gaz naturel, l'énergie nucléaire et l'énergie hydraulique ont des profils similaires tandis que les énergies nouvelles connaissent un essor notable : avec une consommation de 2,6 Gtep elles occupent la 4^e place. A l'inverse, les énergies non commerciales régressent et ne représentent que 0,7 Gtep en 2060. Le

pétrole observe lui un fléchissement continu de sa demande : elle plafonne dans les années 90 et décline ensuite régulièrement jusqu'à 2,3 Gtep en 2060. Il occuperait alors la 5^e place.

La figure ci-dessous traduit l'évolution des approvisionnements mondiaux dans le cas " C ".



Source : Conférence mondiale de l'énergie, 1986, Synthèse des travaux, p.340.

Un autre point intéressant à noter est le phénomène de relais des sources d'énergie les unes par rapport aux autres dans la satisfaction des besoins mondiaux.

L'ensemble " hydraulique + gaz naturel + charbon " demeure stable : il représentait, en 1960, 53 % de la demande mondiale d'énergie, 47 % en 1980. En 2060, il devrait représenter 59 % selon la variante " C ". Par contre, " pétrole + énergies non commerciales " accuse un profond déclin : de 51 % en 1980, leur part n'est plus que de 15 % en 2060.

Enfin, seul l'ensemble " nucléaire + énergies nouvelles " réalise une véritable percée : 2 % en 1980, il progresse de manière continue jusqu'en 2060 où il représenterait 26 % de la consommation mondiale d'énergie. On peut ajouter à cela que les ressources non renouvelables continueront à occuper une place prépondérante avec 75 % des apports énergétiques totaux en 2060, en légère diminution par rapport à 1980 (85 %). Parmi elles, les combustibles fossiles seront largement consommés (plus de 60 % des approvisionnements mondiaux).

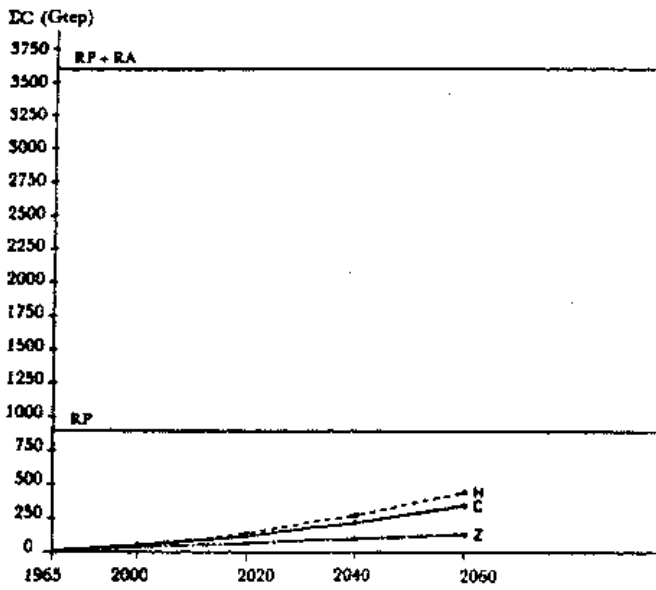
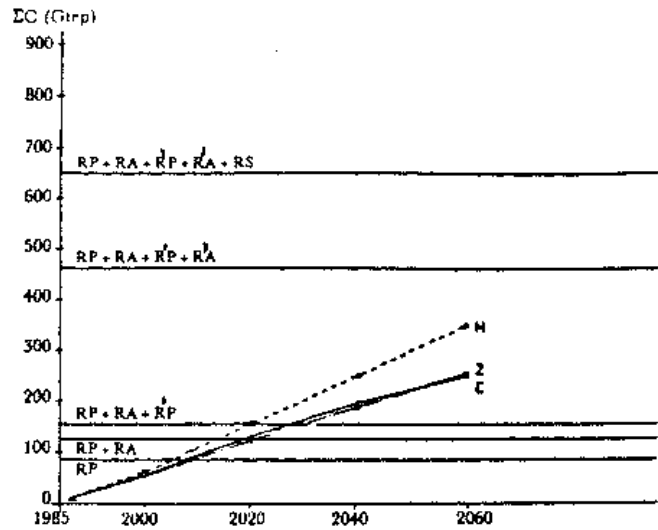
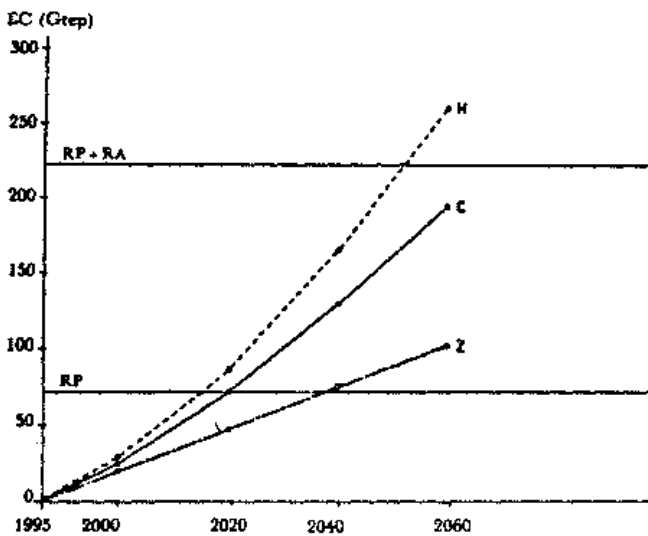
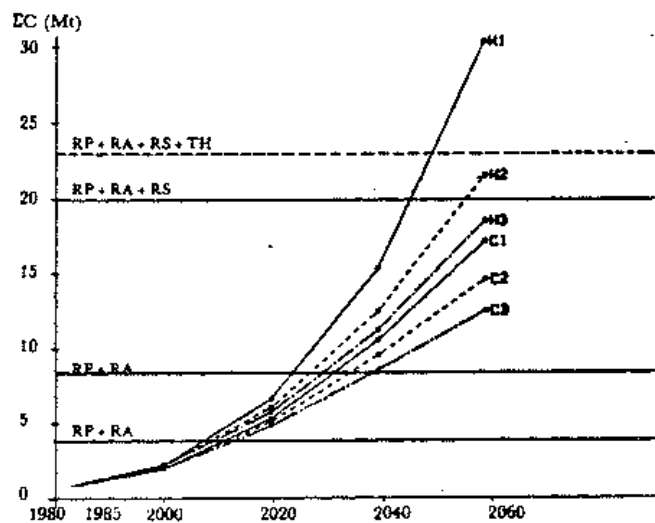
Le recours aux ressources non renouvelables devrait donc persister longtemps encore.

D'où la nécessité de confronter les besoins énergétiques avec ces ressources et plus précisément leur potentiel dans le sol. Cela nous amène à étudier les tensions demande/réserves (voir page suivante). Une tension apparaît à chaque fois que la consommation cumulée d'une ressource énergétique donnée atteint le niveau de réserves prouvées de cette ressource. Cette tension sera d'autant plus aigüe que les réserves additionnelles, voire spéculatives, se sont épuisées progressivement.

Naturellement, les tensions demande/réserves s'aggravent dans le temps. Nous présentons donc pour les quatre ressources non renouvelables les tensions issues de pression exercée par la demande sur leur niveau respectif de réserves en mettant l'accent sur le moyen et long terme.

Les combustibles minéraux solides constituent la source plus abondante à l'échelle mondiale. Il n'apparaît donc pas de risque de tension physique même à très long terme. Au contraire, pour le pétrole, son potentiel semble insuffisant par rapport à la demande prévisible. L'étude montre que les réserves prouvées de pétrole conventionnel seraient épuisées vers 2010-2020 ; les réserves prouvées de pétrole non conventionnelles vers 2030. La raréfaction inévitable de la ressource au -delà de 2000 va induire par ailleurs une non moins inévitable montée du prix. Au delà des hésitations du court terme, le prix ne peut durablement s'orienter à la baisse du fait de tensions physiques sur les disponibilités les plus accessibles.

LES TENSIONS DEMANDE/RESERVES

*Monde. Combustibles solides.**Monde. Pétrole.**Monde. Gaz naturel.**Monde. Uranium.*

D'après Conférence Mondiale de l'Energie, Energie, Besoins, Espoirs, 13ème congrès, Cannes 1986, Synthèse des travaux.

Le gaz naturel va suivre une évolution similaire à celle du pétrole. Ses réserves prouvées seraient épuisées vers 2020, et, en 2060, il ne disposerait que de 25 % des réserves additionnelles. (hypothèse C). Le gaz ne peut donc apporter de solution relais à long terme au pétrole.

Enfin, l'uranium, avec les filières actuelles (1), fait l'objet de fortes tensions sur les approvisionnements ; dès 2010, épuisement des réserves prouvées et vers 2030 des réserves additionnelles (hypothèse H).

A moyen terme (2000 - 2020), les tensions concernent ainsi trois ressources non renouvelables (le pétrole, le gaz et l'uranium) au niveau mondial avec des intensités différentes selon les régions de monde (les pays industrialisés sont dans l'ensemble plus affectés que le tiers monde qui reste encore préservé). En 2020, l'ensemble du pétrole bon marché serait épuisé. En effet, la consommation cumulée en 2020 atteint 120 Gtep tandis que le niveau des réserves prouvées s'établit à 97 Gtep.

Pour le gaz naturel, ses réserves prouvées (74 Gtep) seraient utilisées. Les quantités d'uranium (26 Gtep) seraient elles aussi insuffisantes face aux consommations cumulées. (34 Gtep en 2020).

En tout état de cause, l'extinction des réserves prouvées de pétrole conventionnel avant 2020 apparaît fortement possible selon l'hypothèse centrale (sauf baisse du niveau de la consommation mondiale ou forte réévaluation des réserves prouvées).

A long terme (2020 - 2040), les tensions au niveau mondial concernent principalement le pétrole et l'uranium. Il y a aggravation de la pression exercée sur leurs réserves respectives : d'ici 2030, les réserves additionnelles conventionnelles et les réserves prouvées non conventionnelles de pétrole ainsi que les réserves additionnelle d'uranium seraient épuisées. Enfin à très long terme (2040 - 2060), compte tenu des tensions énumérées précédemment, le patrimoine énergétique de la planète serait bien entamé.

Il subsiste alors seulement 2/3 des réserves additionnelles non conventionnelles et l'intégralité des ressources en pétrole, 25 % des réserves additionnelles de gaz, 35 % des réserves spéculatives d'uranium et 40 % des réserves prouvées de charbon. La situation mondiale est plus préoccupante pour le gaz, l'uranium et le pétrole que pour le charbon.

(1) Il s'agit de réacteurs nucléaires à cycle ouvert. Une tonne d'uranium utilisée dans un tel réacteur permet de produire en moyenne l'équivalent de 8000 tep.

Afin de compléter l'étude, il n'est pas inutile de noter l'importance des variantes de sensibilité élaborées dans le rapport cité.

Concernant la ressource en uranium, des technologies différentes correspondant à des options particulières permettraient de rendre plus performant le cycle du combustible ; en particulier, à production énergétique égale, le prélèvement amont sur la ressource serait diminué. Deux variantes nucléaires correspondent ainsi à l'introduction des surgénérateurs (1). La première variante est relative à une pénétration moyenne et la seconde à une pénétration maximale.

Dans les deux cas, la pénétration des surgénérateurs dans le parc nucléaire ne peut être que progressive en raison de la nécessité de disposer d'un stock initial de plutonium (produit par les réacteurs classiques) suffisant pour amorcer la production des surgénérateurs.

De ce fait, d'ici 2060, l'introduction des surgénérateurs n'apporte qu'un gain limité sur l'épuisement des réserves prouvées et des réserves additionnelles : l'économie de consommation permet de retarder l'épuisement des réserves prouvées de 1 à 2 ans et celui de réserves additionnelles de 3 à 6 ans. Elle n'est véritablement significative qu'au delà de 2060. Dans le cas d'une pénétration moyenne, la date d'épuisement est repoussée aux alentours de 2090. La production supplémentaire d'énergie depuis 2060 serait de l'ordre de 100 Gtep. Les surgénérateurs permettrait de gagner 15 ans de production nucléaire sur l'option de référence constituée par les réacteurs thermiques. Dans le cas d'une pénétration maximale, la date d'épuisement final se situerait aux alentours de 2110 - 2120 et la production d'énergie générée depuis 2060 serait de l'ordre de 260 Gtep. Cette variante permet de gagner 35 à 50 ans sur l'option de référence. Les deux variantes opèrent seulement au-delà de 2060 en retardant l'épuisement final de la totalité des ressources uranifères (y compris les ressources spéculatives) de 15 à 50 ans maximum par rapport à l'option "réacteurs thermiques" (épuisement prévu vers 2073). Cependant, seule la variante "maximale" constituerait une réelle alternative au pétrole à très long terme.

Une variante opposée aux deux précédentes permet d'envisager un avenir tout à fait différent : il s'agit d'étudier l'effet d'un moratoire nucléaire décidé en 1990. La perte de production nucléaire qui en résulterait serait de 50 % en 2000, 90 % en 2020 et totale au-delà. Ce manque serait alors comblé par des énergies de substitution : le gaz naturel dans

(1) Une tonne d'uranium dans un réacteur surgénérateur permet de produire en moyenne l'équivalent de 500000 tep contre 8000 tep dans le cas d'un réacteur thermique actuel (à cycle ouvert) ; soit un rapport de 1 à 60.

une moindre mesure, le charbon et les énergies renouvelables (hydraulique + énergies nouvelles) essentiellement. En 2060, le déficit de 2 Gtep serait ainsi rattrapé à hauteur de 50 % pour le charbon, 40 % pour les énergies renouvelables et 10 % pour le gaz naturel. Compte tenu de l'ampleur des réserves prouvées de charbon dans l'ensemble du monde, les transferts apparaissent comme physiquement possibles.

D'ici à 2060, la consommation cumulée supplémentaire de charbon pourrait excéder 70 milliards de tep. Les pays industrialisés occidentaux verraient cependant leurs réserves prouvées s'épuiser 10 ans plus tôt. Pour le gaz naturel, la date d'épuisement serait anticipée de 1 à 2 années seulement. Enfin, le report important vers les énergies renouvelables se traduirait par un supplément de production cumulée hydraulique mondiale de 7 Gtep et d'énergies nouvelles de 17 Gtep d'ici 2060.

Avant de conclure, signalons que deux autres hypothèses ont également été considérées : l'hypothèse " limitation des combustibles fossiles " et l'hypothèse " limitation du bois de feu " (1).

L'hypothèse relative aux combustibles fossiles implique qu'en cas de contraintes d'environnement (lutte contre les pluies acides, limitation de CO₂ ou NO_x) la demande de combustibles fossiles serait alors plafonnée à 2,5 Gtep dès 1990. Dans ce cas, pour combler le déficit, les énergies nouvelles (solaire, fusion) et renouvelables (hydraulique) et l'énergie nucléaire seraient sollicitées. Les pays industrialisés seraient naturellement les plus touchés.

L'hypothèse relative à la limitation du bois de feu concerne les régions du Tiers Monde. Dans ces régions, la production de bois de feu est souvent insuffisante alors que celui-ci représente un approvisionnement énergétique privilégié des populations rurales. De plus, les prélèvements de bois menacent l'équilibre écologique des terres. Un déclin plus rapide que prévu des disponibilités en bois de feu impliquerait un report sur les énergies commerciales ; le pétrole d'abord, mais aussi les énergies nouvelles et dans une moindre mesure le gaz naturel. Les prélèvements qui en résultent ont pour effet d'anticiper l'épuisement des réserves de façon inégale : les pays d'Afrique Noire ou encore situés en Asie du Sud (Inde notamment) sont plus touchés que les pays d'Amérique Latine (Brésil) ou d'Asie du Sud Est.

(1) Pour de plus amples précisions, se référer à : J-R FRISCH, opus cité, p.210-212, 224-227.

Compte tenu de l'ensemble de ces informations, les perspectives énergétiques mondiales amènent à se poser la question suivante : peut-on manquer d'énergie dans les décennies à venir ?

Dans la mesure où des tensions sérieuses concernent trois ressources énergétiques d'importance majeure - uranium, pétrole et gaz naturel - d'ici le milieu du siècle prochain, il est nécessaire d'opérer des substitutions au sein du patrimoine énergétique. A long terme, il faudra compter sur le renfort progressif des énergies renouvelables qui peu à peu relayeront les énergies de stocks. Au delà des aléas de la conjoncture énergétique, qui, dans le cas du pétrole par exemple, se traduit par des hausses et des baisses du niveau des prix issues des variations conjoncturelles de la consommation mondiale (1), il faut préparer l'avenir et réfléchir sur un " *new deal énergétique* ". Il faudra alors pour y parvenir se donner les moyens de la transition d'un système énergétique basé sur la prépondérance des ressources fossiles vers un nouveau qui ne leur laisserait qu'une place marginale pour la satisfaction d'usages spécifiques. Le vecteur fondamental de cette transition est constitué par l'ensemble des technologies de conversion de l'énergie brute en énergie domestique. Ce point essentiel de notre étude sera examiné plus loin.

Pour le moment, nous allons examiner les instruments conceptuels qui ont permis tout au long de ce chapitre de quantifier les ressources énergétiques. Cet arrêt sur image en quelque sorte est un préalable nécessaire à la mise en évidence des imperfections sous jacentes à certains concepts foisonnants dans les études et les statistiques relatives à l'énergie. L'usage courant de tels instruments peut aussi fausser une bonne lecture du patrimoine énergétique, que cette lecture soit statique ou bien dynamique.

(1) *Le Monde*, "le grand spectacle du pétrole", 29.11.1989.

§ 3 - Les limites de la mesure

Nous étudierons ici les problèmes posés par le concept économique de " réserve " dans un premier temps avant d'aborder la question des équivalences énergétiques à travers une unité particulière, la tonne équivalent pétrole.

En se référant à la notion de "réserve ", on exprime de facto une mesure en termes économiques de la ressource considérée dont on peut déduire une limite relative de la ressource utilisable par l'homme. Cette limite est seulement considérée comme relative dans la mesure où toute réserve évolue dans le temps en fonction de nombreux paramètres (1) et fait donc l'objet de réévaluations successives.

Nous avons constaté que les estimations des ressources énergétiques se sont jusqu'à présent révélées trop basses. Dans le cas des hydrocarbures, il existe encore de nombreuses zones sédimentaires où des découvertes sont probables. De plus, les sables asphaltiques et les schistes bitumineux constituent une réserve d'hydrocarbures non négligeable. Avec les progrès techniques, il est possible d'envisager une meilleure exploitation des gisements pétrolifères et donc d'augmenter les quantités accessibles de la ressource.

Considérer cependant que les ressources contenues dans la croûte terrestre pourraient être considérablement plus importantes que les réserves estimées aujourd'hui ne prouve pas l'inépuisabilité des ressources.

Le concept de réserve constitue un artifice (2) qui occulte la finitude du stock de la ressource fossile et finalement l'épuisement qui découle de l'extraction. Dans la mesure où la planète, en tant que réalité physique, est un stock dont la composition est mesurable, il y a bien finitude absolue et non relative.

Même si les stocks évoluent dans le temps du fait de la découverte de nouveaux gisements ou sous l'effet des progrès techniques, il n'en demeure pas moins que les quantités connues et méconnues sont données à l'échelle de la planète et fixes à l'échelle humaine. Les ressources énergétiques fossiles sont non reproductibles à notre échelle. Elles existent en quantités finies dans le sous-sol et le temps nécessaire à leur formation est sans commune mesure avec la vitesse à laquelle elles sont extraites.

(1) Se reporter au paragraphe 1 de cette section.

(2) Comme l'exprime N. GEORGESCU-ROEGEN : "And since all kinds together are in finite amount, no taxonomic switch can do away with that finiteness". In *Energy and economic myths*, Pergamon press, 1976, p.16.

Cette conception est de nature physique plutôt qu'économique. A travers le concept de réserve on ne maîtrise qu'une coupe instantanée du temps humain que l'on se plaît à prolonger successivement comme si'il était possible de disposer de technologies toujours plus performantes. Les progrès qui se sont opérés depuis la Révolution Industrielle sont nombreux dans le domaine énergétique mais rien n'autorise à croire qu'ils sont illimités ; que les rendements énergétiques peuvent augmenter à l'infini. La notion de réserve doit donc être utilisée avec prudence. Dans la mesure où elle se réfère à une quantité de ressource accessible à un moment donné, elle tronque l'horizon temporel de telle manière que la raréfaction relative de la ressource n'est pas perceptible. Quand on parle de réserve pour une ressource fossile on néglige l'aspect qualitatif lié au caractère non renouvelable de la ressource. Même si implicitement on y fait référence dans la mesure où on s'intéresse aux gisements ayant une valeur économique, gisements accessibles renfermant des teneurs concentrées et donc de qualité, à aucun moment on ne s'interroge sur le sens de la relation qualité-quantité.

La conception du caractère illimité de la ressource est ainsi défendue encore aujourd'hui. J. SIMON (1) exprime ainsi cette idée en dénonçant le concept de limite comme vide de sens en raison des incertitudes et des possibilités de repousser la rareté des ressources. (recyclage et substitution). Il considère aussi que grâce au savoir technique, les ressources naturelles deviennent moins rares : l'homme peut disposer de plus de ressources au fur et à mesure de l'écoulement du temps.

Cependant, il faut bien considérer que les quantités extraites aujourd'hui sont relatives à des concentrations de minerais élevés et que par ailleurs les quantités de qualité moins bonne demeurent dans le sous-sol. Les quantités sont données une fois pour toutes tandis que les gisements de qualité sont épuisés progressivement. Les raretés relatives à une ressource dans le temps -raréfaction - de ce point de vue conduisent à l'épuisement des meilleurs gisements ; épuisement perceptible à long terme. A l'échelle géologique il y a donc des tensions sur les dotations énergétiques terrestres.

D'après les estimations de C. GUILLEMIN (2), les produits énergétiques fossiles sont limités dans le temps à l'échelle géologique. Afin d'évaluer la durée des ressources à partir de considérations géologiques, les estimations sont effectuées à partir des volumes géo

(1) Cité dans P-H BOURRELIER, R. DIETRICH, Le mobile et la planète ou l'enjeu des ressources naturelles, Economica, 1989, p.71-73.

(2) C. GUILLEMIN, "Matières premières minérales et énergétiques : quels enjeux ?", Futuribles, juillet-août 1985, p.19-21.

métriques des formations géologiques pouvant contenir des produits énergétiques. En retenant un niveau de consommation pour 2050 de 14 Gtep, dans le cas où seuls les charbons seraient sollicités, cela ne donnerait que 7 à 9 siècles de répit à l'humanité. Il faut préciser ici que l'auteur se place dans les conditions les plus optimistes et qu'il retient une prévision de consommation largement inférieure à la plupart des prévisions réalisées. Pour mémoire, rappelons que la consommation prévue lors de la Conférence mondiale de l'énergie s'établit entre 18 et 26 Gtep en 2040 ; entre 21 et 33 Gtep en 2060 !

Ainsi, la réévaluation des réserves ne doit pas induire en erreur : si il s'agit d'un processus dynamique orienté par les progrès techniques, la découverte de nouveaux gisements et le rythme d'extraction, il n'en demeure pas moins trompeur à l'égard de l'immobilité des ressources fossiles. Pour percevoir les limites du concept, il faut se placer à une échelle de temps plus longue qui intègre à la fois la rareté relative à la quantité et la rareté relative à la qualité. Il nous paraissait important de mentionner quelques réserves à son égard pour saisir la finitude spatio-temporelle des ressources.

Un second point a retenu notre attention : il s'agit de l'unité utilisée abondamment dans les bilans énergétiques en économie : la tonne équivalent pétrole (tep). La tonne équivalent pétrole définie par son contenu calorifique constitue une unité commune de mesure des quantités d'énergie. Cependant, selon les sources, la conversion d'un combustible en tep va être différente (1) : il y a donc problème au niveau des coefficients de conversion. Les valeurs de la tep varient ainsi de 10 000, 10 120 à 10 340 thermies. La thermie étant une unité d'énergie, on peut l'exprimer en joule :

$$1 \text{ thermie} = 4,1855 \text{ MJ (mégajoules} = 10^6 \text{ joules)}$$

$$\text{d'où : } 41,855 \text{ GJ} \leq 1 \text{ tep} \leq 43,278 \text{ GJ}$$

L'utilisation de la tep au niveau des coefficients de conversion est équivoque. Un exemple révélateur est celui de la relation d'équivalence entre l'électricité et les combustibles. On considère que pour produire de l'électricité, il s'agit de remplacer " l'électricité dite primaire par la quantité de combustible qu'il aurait fallu brûler dans une centrale thermique pour obtenir la même quantité d'électricité " (2).

(1) J. FEDERWISCH, TH. DUBOIS, E. TISSOT, "Comparaison de bilans énergétiques", in J. FERICELLI, J-B LESOURD, *Energie : modélisation et économétrie*, Economica, 1985, p.381-416.

(2) opus cité, p.387.

Une solution possible est d'adopter une valeur constante : 1000 kwh = 0,222 tep.

Il s'agit dans ce cas d'une équivalence à la production : il faut fournir 0,222 tep de combustible pour produire 1000 kwh compte tenu du rendement moyen des centrales. Une autre façon de traduire cela est de considérer que 1 kwh vaut 2,2 thermies. Une tep vaut dans ce cas 4500 kwh.

On peut aussi retenir l'équivalence à la consommation : 1000 kwh = 0,086 tep. Des organismes internationaux comme l'OCDE, l'ONU adoptent ainsi un coefficient d'équivalence pour l'électricité qui n'est autre que la valeur physique de l'électricité :

$$1 \text{ kwh} = 0,86 \text{ th} = 3600 \text{ kJ}$$

soit, pour un pouvoir calorifique de 1 tep égal à 10 000 thermies, l'équivalence à la consommation citée. Un tep vaut ici 11 626 kwh.

Cependant, suivant les valeurs retenues, on peut avoir un écart de l'ordre de 3,4 % entre les deux extrêmes :

$$0,08318 \text{ tep} \leq 1000 \text{ kwh} \leq 0,086 \text{ tep}$$

(pour 1 tep = 10340 thermies)

(pour 1 tep = 10000 thermies)

Selon le contenu calorifique retenu, des écarts non négligeables apparaissent et doivent conduire à une prudence dans l'utilisation de la tep comme unité de mesure et dans les comparaisons énergétiques qu'elle autorise.

Si il est nécessaire de recourir à une unité de mesure commune, il semble que le joule devrait remplacer toutes les unités énergétiques (1) (la tep mais aussi le kwh, les thermies). Il faudrait cependant compter séparément les diverses formes d'énergie et les agréger en tenant compte des coefficients de substitution. Les joules de chaleur et les joules d'électricité sont différents. Ainsi, le coefficient moyen de substitution entre électricité et combustibles est fixé à 2,6 (2). Cela signifie que pour produire 1 joule d'électricité il faut 2,6 joules de combustible. Par contre, à l'utilisation finale, 1 joule d'électricité égale 1 joule de combustible.

(1) P. AILLERET, "Les erreurs auxquelles peuvent donner lieu les équivalences entre formes différentes d'énergie", Revue de l'énergie, septembre 1981, p.419.

(2) P. AILLERET, opus cité. Cette équivalence est relative à la production.

Le joule est l'unité internationale qui permet de mesurer la chaleur ou le travail ; c'est l'unité d'énergie " légale ". L'utilisation plus large de cette unité, fondée sur les apports du principe d'équivalence ou principe de conservation (1), permettrait de rendre compte d'une réalité avant tout physique et non économique : à partir de la relation qui lie les trois unités de mesure (thermie, joule et watt/heure) on peut agréger les formes différentes d'énergie en joules. On rappelle que 1 thermie = 4,1855 mégajoules = 1,161 kwh.

L'évaluation des ressources en joules, en thermies ou en calories (1 calorie = 4,185 joules) permettrait d'apprécier leur valeur sans faire référence à l'hégémonie économique et géopolitique d'une ressource particulière, en l'occurrence le pétrole. N'oublions pas qu'avant le développement des produits pétroliers, la tonne équivalent charbon (tec) était l'unité de mesure répandue dans les bilans énergétiques. Quelle est la logique d'une évaluation en tep ou en tec ? Elle est par essence purement économique. Encore une fois, il est souhaitable de considérer les ressources pour elles-mêmes, de nature physique et non économique (enjeux de pouvoir, de conflits...). Le recours à la tec puis à la tep est totalement conventionnel. Il exprime à tort qu'il suffit d'avoir du charbon ou du pétrole pour satisfaire les besoins en énergie. Cela repose sur l'idée d'une substituabilité absolue.

Le danger d'une énergie devenue étalon de mesure est de croire que l'énergie de référence - le pétrole avec la tep - puisse satisfaire les besoins énergétiques dans leur ensemble. Afin d'éviter cet écueil, plutôt que de considérer un multiple d'une unité physique de chaleur comme c'est le cas avec la tep, il serait préférable de retenir une unité d'énergie exclusivement. Nous ne pensons pas comme P. RAMAIN (2) que, dans la mesure où nous acceptons une mesure de l'énergie en fonction de son contenu calorifique, l'ensemble des unités de mesure calorifique soit recevable ; seules les unités directes (calories, thermie, watt/heure, joule) nous semblent appropriées à une lecture adéquate du patrimoine énergétique.

La tep considérée comme unité de compte dans les bilans énergétiques ne permet pas une comparaison objective des différentes ressources. Considérer une énergie comme unité de mesure constitue une hérésie.

(1) J-M CHEVALIER et al., *Economie de l'énergie*, 1986, p.119.

(2) P. RAMAIN, *Réflexions critiques sur les bilans énergétiques*, CNRS, Energie et société, 1977, p.92.

A plus forte raison, si l'on considère les changements relatifs à la production d'électricité notamment, l'utilisation de la tep telle qu'elle est définie peut perdre tout son sens (1). Les kwh sont évalués en tep sur la base de l'équivalence à la production déjà citée. On se réfère ainsi au rendement des centrales thermiques classiques. Cependant, du fait l'importance des développements de la production d'électricité d'origine nucléaire et hydraulique et parallèlement du recul de la production d'électricité à partir des centrales thermiques, il apparaît injustifiable de compter les kwh en tep encore longtemps puisque la consommation de combustibles sera dérisoire. Comme l'indique l'auteur, il faudra considérer les différents usages concurrentiels des combustibles fossiles et de l'électricité, ce qui implique l'impossibilité de dégager une valeur unique d'équivalence : à chaque usage sera associé un coefficient de substitution.

Compte tenu des deux natures différentes d'énergies, l'une relative aux combustibles fossiles et l'autre à l'électricité d'origine nucléaire, hydraulique (voire solaire), la comparaison ne pourra se faire avec comme unité de mesure la tonne équivalent pétrole.

On comprend ainsi les limites à l'utilisation d'une énergie comme mesure des ressources énergétiques. Ces imperfections relatives aux concepts, aux méthodes d'évaluation (équivalence entre énergies et coefficients de conversion) nous conduirons à rechercher des instruments plus adéquats pour apprécier le patrimoine énergétique. De tels instruments existent déjà hors du champ économique. Nous nous attacherons à les valoriser dans la deuxième partie de notre travail et à montrer leur portée pour une meilleure compréhension du système énergétique.

(1) P. AILLERET, "Equivalences énergétiques en l'an 2000, la fin des TEC et des TEP", *Revue de l'énergie*, novembre 1972, p.53.

Conclusion du chapitre premier

L'histoire du système énergétique est ponctuée par l'apparition d'innovations majeures à l'origine d'une succession de systèmes techniques différents. Un temps fort de cette évolution est caractérisé par la rupture opérée avec la Révolution Industrielle, Révolution thermo-industrielle selon l'expression de J. GRINEVALD. C'est à partir de cette période historique que le système va évoluer sur un sentier inidirectionnel accordant l'hégémonie des ressources non renouvelables et destabilisant ainsi le patrimoine énergétique planétaire.

Le résultat est un constat sans appel : depuis l'industrialisation, les dotations énergétiques sont constamment amenuisées ce qui laisse présager, compte tenu de la pression démographique, des manques d'énergie accessible pour le 21ème siècle ; sauf à reconsidérer la place des ressources renouvelables dans le développement des sociétés.

CHAPITRE 2 : LE SYSTEME ENERGETIQUE ET LA BIOSPHERE

Introduction

Le système énergétique possède une double dimension source de conflits : il relève du domaine économique en tant que système organisant les activités humaines dans le but d'une allocation des ressources rares, et du domaine physique en tant que structure résultant de la combinaison d'éléments physico-chimiques enclavés dans l'environnement. Cette caractéristique originale fait ainsi apparaître des relations d'interdépendance entre les niveaux physique et économique, relations qui génèrent des perturbations très fortes sur les espaces naturels et de manière plus globale sur l'ensemble des équilibres de la biosphère.

La relation causale énergie ----> biosphère semble dominer la relation inverse, ce qui exprime une menace croissante du système énergétique sur la biosphère. Cette menace est d'ailleurs renforcée par la variable démographique au sein des pays en développement où la quête de l'énergie s'accompagne de la destruction d'écosystèmes forestiers. Le développement des sociétés peu développées induit ainsi une pression exacerbée sur les ressources pour la satisfaction de besoins énergétiques croissants.

L'objet de ce chapitre est de révéler les relations d'interdépendance et de montrer le rôle clé de la croissance démographique dans les déséquilibres de l'environnement naturel.

Section 1 - La relation énergie-biosphère

§1 - Elargissement du cadre spatio-temporel

L'examen du patrimoine énergétique a mis en évidence le rôle majeur des activités de production-consommation et les tensions qui en résultaient dans sa dynamique de long terme. Sa pérennité, conditionnée par la permanence des flux et des stocks de ressources, s'est révélée menacée par la dilapidation outrancière des stocks dont les délais de reconstitution sont gigantesques. Tout au long des cycles qui se sont succédés, disons depuis l'avènement de la machine à vapeur dans les pays industrialisés, la place accordée aux ressources fossiles n'a cessé de se renforcer tandis que les ressources renouvelables demeuraient en marge du développement

économique de ces pays. Plus près de nous, les pays en développement ont pour la plupart recours abondamment aux ressources en bois, plus généralement en biomasse, pour satisfaire leurs besoins énergétiques.

Les enseignements tirés de l'histoire du système énergétique, se résument de la manière suivante :

- les sociétés peu développées satisfont leurs besoins énergétiques à l'aide des convertisseurs naturels. Les ressources en eau, vent ou biomasse sont dans ce cas concernées et satisfont des besoins énergétiques élémentaires

- au fur et à mesure que les sociétés se développent, leurs besoins en énergie deviennent plus nombreux et se complexifient. Des convertisseurs artificiels et élaborés sont utilisés pour la transformation quasi-exclusive des ressources fossiles qui sont l'élément moteur du processus de développement.

Est-ce à dire que le développement économique ne peut reposer que sur l'exploitation des ressources dont les dotations sont fixées une fois pour toutes ? L'accroissement des besoins énergétiques inéluctable ne peut-il être détaché du seul recours aux énergies fossiles ?

Notre réponse à ces questions est qu'un bon nombre de signaux révèlent aujourd'hui les faiblesses d'un développement économique axé sur les ressources non renouvelables : épuisement des stocks, rejets de gaz carbonique...

Si, hier, il n'était pas possible de mesurer les conséquences de cette réalité, nous sommes en mesure à l'heure actuelle de faire un bilan et d'en tirer des conclusions pour l'avenir. Une des erreurs majeures est d'avoir considéré le développement des ressources fossiles comme un élément de la sphère économique sans prendre en compte l'environnement dans lequel elle s'insère. Les ressources énergétiques fossiles ont permis de répondre facilement et rapidement aux besoins de la révolution industrielle et elles n'ont constitué que des produits, des biens économiques quelconques.

Le processus d'extraction-transformation associé à la ressource appartient au domaine économique et obéit donc à ses lois (maximisation du profit...) Cependant, la ressource, elle, appartient avant tout à l'environnement naturel. Il y a donc conflit entre les caractéristiques propres de la ressource qui relèvent du domaine de la nature et la transformation de la ressource accomplie par l'activité économique.

Les termes de ce conflit s'expriment aujourd'hui à deux niveaux :

- au niveau de l'espace : le développement économique procède de prélèvements sur les stocks de ressources fossiles et libère des déchets ou produits résiduels dans l'environnement.
- au niveau du temps : à l'aube de l'industrialisation les effets de l'exploitation des ressources fossiles étaient inexistantes. Un siècle après, ces effets sont perceptibles et les équilibres naturels sont menacés (processus cumulatif de rejets polluants).

Il apparaît donc erroné d'étudier encore plus longtemps le système énergétique sous l'angle économique, ce qui constitue une vision fortement réductrice du réel. Une ouverture sur la biosphère qui le contient est nécessaire pour comprendre comment opère la relation entre elle et les ressources énergétiques sur une échelle de temps séculaire. Compte tenu de la multitude des acceptions courantes relatives à ce concept, il est naturel d'en préciser le contenu terminologique.(1)

La biosphère se définit comme " l'ensemble des organismes vivants et des milieux biotiques. Elle comprend une partie de la lithosphère, de l'hydrosphère et de l'atmosphère " (2)

F. RAMADE définit la biosphère comme " la région de la planète qui renferme l'ensemble des êtres vivants et dans laquelle la vie est possible en permanence " (3). Etymologiquement, le mot biosphère désigne exclusivement la sphère du vivant. Cependant, on peut considérer qu'elle englobe aussi l'inanimé. Pour R. DAJOZ (4), la biosphère réunit la totalité des écosystèmes. L'écosystème est constitué de deux composants. Le biotope est une partie de l'espace contenant des ressources suffisantes pour permettre le maintien de la vie ; il peut être de nature inorganique ou organique. La biocénose est abritée au sein du biotope et est constituée d'un groupement d'êtres vivants rassemblés par l'attraction non réciproque qu'exercent sur eux les divers facteurs du milieu. Ce groupement est caractérisé par l'existence de phénomènes d'interdépendance et par une composition spécifique déterminée.

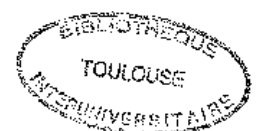
La biosphère peut aussi être considérée comme un vaste écosystème dont l'homme est l'espèce dominante qui dans ses activités agricoles et industrielles menace les équilibres biologiques

(1) J. GRINEVALD, "Note sur le terme biosphère", *Stratégies énergétiques, biosphère et sociétés*, octobre 1991, p.61-62.

(2) J.A. TERNISIEN et al. , *Dictionnaire usuel de l'environnement et de l'écologie*, Guy Le Prat, 1981, p.48.

(3) F. RAMADE, *Eléments d'écologie, écologie fondamentale*, Mac Graw-Hill, 1984, p.1.

(4) R. DAJOZ, *Précis d'écologie*, Dunod, 1971, p.249.



ques (1). Le système énergétique est un élément de la biosphère. Les ressources en tant qu'entités physiques mais aussi leur extraction-transformation en tant que processus économique exercent un effet fortement destructurant. L'équilibre biologique (2) se réfère pour un écosystème donné à sa structure et à son fonctionnement qui se caractérisent par un état stable. L'homme dans ses activités imprime à la biosphère des modifications au sein de ces équilibres biologiques : la relation de causalité semble aller dans le sens énergie ----> biosphère. Si l'on considère par ailleurs le décalage qui existe entre la vitesse à laquelle s'opèrent ces transformations et la vitesse d'adaptation de l'écosystème que constitue la biosphère, les effets négatifs résultant de l'extraction-transformation des ressources énergétiques sont prédominants sur les limites ou réponses que la biosphère impose à son exploitation abusive (expression de la relation causale biosphère ----> énergie). Les équilibres biologiques de la biosphère sont donc menacés et nous conduiront naturellement à reconsidérer le rôle modérateur des ressources renouvelables au sein du système énergétique.

La biosphère dans ce contexte, s'identifie au système écologique global intégrant tous les organismes vivants avec la lithosphère -les roches-, l'hydrosphère -l'eau-, et l'atmosphère -l'air- dans un métabolisme global qui transforme la Terre en unique "planète vivante" du système solaire. Cette définition traduit une conception interdisciplinaire et de nature holiste. (3)

Nous allons ainsi étudier la relation énergie-biosphère en examinant les effets et les réponses à long terme du système énergétique et de la biosphère. Si jusqu'ici le système énergétique était considéré comme l'unique moyen de fournir à l'homme l'énergie désirée (4), il importe plus à présent de prendre en compte sa dimension extra-économique afin de mesurer l'étendue des impacts qu'il a générés et génère encore sur les équilibres de la biosphère.

La dynamique à long terme du système énergétique pourra être reconsidérée au regard de l'évolution de la biosphère, des enseignements tirés des faits eux-mêmes. La relation énergie-biosphère est de nature dynamique et donc évolutive. Nous essaierons de comprendre la structure et le fonctionnement des deux composantes de cette relation en soulignant les interactions pertinentes pour notre propos.

(1) J. A. TERNISIEN, opus cité, p.48.

(2) D'après J.A. TERNISIEN, "l'équilibre biologique est un état où les interactions entre les différentes espèces animale et végétales sont telles que la structure et le fonctionnement d'un écosystème restent sensiblement constants".

(3) J. GRINEVALD, opus cité, p.62. Nous reviendrons plus tard sur l'intérêt de cette conception de la biosphère.

(4) Chaleur domestique, transport, éclairage, force mécanique...

§ 2 - Le système énergétique, agent perturbateur de l'environnement naturel

Nous nous intéressons ici aux perturbations issues des activités humaines dans le domaine de l'énergie de manière exclusive. Les activités énergétiques génèrent à elles seules 90 % des émissions de substances toxiques dans l'atmosphère et la quasi totalité de la pollution thermique leur incombe (1). Par ailleurs, ces émissions de matière et d'énergie s'effectuent tout au long des étapes du cycle de production (extraction de la ressource énergétique, transport, transformation... jusqu'à la gestion des déchets) comme cela a été montré lors de la conférence mondiale de l'énergie en 1986. Le tableau suivant traduit les effets des activités énergétiques sur l'environnement (2). Même si ce classement demeure arbitraire, il permet de mesurer les effets sur l'environnement selon leur degré de nocivité. C'est en quelque sorte une appréciation qualitative perçue à un moment donné compte tenu de la disponibilité des ressources et de l'état de la technologie.

Cependant, si l'on souhaite comprendre comment les activités énergétiques et la biosphère sont interconnectées, il faut dépasser ce cadre statique en mettant en évidence les aspects dynamiques de ces perturbations. Après avoir expliqué les équilibres biologiques de la biosphère qui nous intéressent du point de vue de la relation énergie, biosphère, nous serons à même de comprendre comment les activités énergétiques affectent la composition chimique de la biosphère dans l'espace temps.

Nous étudierons comment la biosphère peut répondre à ces perturbations et donc tenter de s'adapter à l'action de l'homme. Nous percevrons les limites de sa réponse au système énergétiques. Enfin, les certitudes et les incertitudes qui pèsent à long terme sur les effets du système énergétique seront mises en évidence.

(1) J-M MARTIN, "Energie et environnement", *Les Cahiers Français*, n°236, mai-juin 1988, p.58.

(2) Conférence mondiale de l'énergie, *Energie, besoins, espoirs*, Synthèse des travaux, Cannes 1986, p.103.

Impact sur l'environnement des différentes sources d'énergie

Energie		Charbon	Pétrole	Gas naturel	Fission nucléaire	Fusion nucléaire	Solaire photovoltaïque	Méthanol et éthanol	Géothermie
Extraction des matières premières	1	*	□	□	*	□	□	□	
	2	*	□	□	*	□	*	□	
	3	*	□	□	*	□	□	□	
	4	□	□	□	□	□	□	□	
	5	**	*	*	*	□	*	*	*
	6	□	□	□	□	□	□	*	□
	7	□	□	□	□	□	□	□	□
	8	***	*	*	**	*	*	*	*
	9	**	*	*	*	*	*	***	*
Transport et transformation des matières premières	1	*	□	□	*	□	□	□	
	2	*	□	□	*	□	□	□	
	3	*	□	□	*	□	□	□	
	4	□	**	□	□	□	□	*	*
	5	**	**	□	□	□	□	*	*
	6	*	*	□	□	□	□	□	□
	7	□	*	□	□	□	□	□	□
	8	***	**	*	**	□	□	**	*
	9	*	*	*	□	□	*	***	*
Construction et démantèlement des centrales	1	*	□	□	□	□	□		
	2	□	□	□	□	□	*	*	
	3	□	□	□	**	*	*	*	
	4	□	□	□	□	□	□	□	
	5	*	*	□	*	*	*	*	*
	6	□	□	□	□	□	□	*	*
	7	□	□	□	□	□	□	□	□
	8	*	*	*	**	*	*	**	*
	9	*	*	*	**	*	*	**	*
Production d'énergie	1	***	*	*	□	□	□		□
	2	**	*	□	□	*	□		**
	3	*	□	□	*	**	□		**
	4	*	*	**	*	*	□		*
	5	*	*	*	*	*	*		**
	6	**	**	**	□	□	*	*	*
	7	**	**	*	□	□	□	*	*
	8	**	**	*	**	*	**	*	*
	9	*	*	*	*	*	*	*	**
Gestion des déchets	1	**	□	□	□	□	□	□	
	2	*	*	□	□	□	*	□	
	3	*	□	□	*	*	□	□	
	4	*	*	□	□	□	□	*	
	5	*	□	□	*	□	□	□	
	6	□	□	□	□	□	□	□	
	7	□	□	□	□	□	□	□	
	8	**	□	□	*	□	□	□	
	9	*	□	□	*	*	□	□	

Légendes :

Effets sur l'environnement

1. Poussières
2. Produits toxiques stables
3. Éléments radioactifs
4. Composés cancérigènes et toxiques
5. Pollution des eaux et altérations hydro-géologiques
6. Altérations climatiques
7. Pluies acides
8. Impact sur les terrains
9. Risques incalculables

Échelle des effets

- : négligeable
 * : faible
 ** : moyenne
 *** : importante
 **** : très importante

Source : Conférence Mondiale de l'Énergie, Synthèse des travaux, op. cité.

A- La perturbation des cycles biogéochimiques

A l'échelle de la biosphère, le cycle biogéochimique se définit comme " un circuit qui, par changement d'états successifs, assure la régénération et le renouvellement des ressources indispensables au maintien de la vie " (1). Les cycles biogéochimiques expriment le passage alternatif des éléments entre milieu inorganique et matières vivantes et dont les diverses phases s'opèrent au sein des écosystèmes. Il est important de noter que l'existence de tels cycles confère un pouvoir d'autorégulation - homéostasie - à la biosphère, pouvoir qui assure la pérennité des écosystèmes. D'où l'intérêt majeur d'étudier les effets du système énergétique sur les cycles biogéochimiques pour comprendre comment ils pourraient à long terme constituer une sérieuse menace pour la survie de la planète.

Nous n'aborderons pas ici l'étude de tous les cycles naturels relatifs à la biosphère (2) mais seulement ceux qui sont concernés par les perturbations du système énergétique. On distingue alors les trois cycles biogéochimiques suivants: le cycle du carbone, le cycle de l'azote et le cycle du soufre.

Le cycle du carbone concerne $20 \cdot 10^6$ milliards de tonnes d'équivalent carbone réparties inégalement entre l'atmosphère, l'océan et l'ensemble des matières organiques. Ce sont les océans qui stockent les quantités les plus importantes de carbone comme l'indique le tableau suivant.

Quantités de carbone dans la croûte terrestre et l'atmosphère

Carbone en circulation	
CO ₂ ou CO ₃ en solution	Gi
Atmosphère	700
Océans	
— couches supérieures	500
— couches profondes	35 000
Carbone organique	
Organismes	
— terrestres	460
— marins	10
Matières organiques décomposées	
— terrestres	700
— marines	3 000
Total C en circulation	environ 40 000 Gi
Carbone fixe	
Carbonates sédimentaires	$20 \cdot 10^6$
Combustibles fossiles	10 000
Total C fixe	environ $20 \cdot 10^6$ Gi

Source : G. SARLOS, P. VESTRAETE, " Le développement énergétique dans la dynamique de l'environnement ", Revue de l'énergie, août-septembre 1989.

(1) J.A. TERNISIEN, Dictionnaire usuel de l'environnement et de l'écologie, Guy Le Prat, 1981, p.77.

(2) A ce sujet, le lecteur intéressé peut consulter : F. RAMADE, Eléments d'écologie, écologie fondamentale, Mac Graw-Hill, 1984.

La teneur en CO₂ du seul réservoir océan est équivalente à près de 60 fois la masse totale de CO₂ atmosphérique.

Annuellement, environ 200 milliards de tonnes de carbone sont émis au cours du cycle. Les deux phénomènes moteurs et antagonistes à l'aide desquels se forment le CO₂ sont la photosynthèse et la respiration. La photosynthèse extrait le CO₂ de l'atmosphère et des océans afin de le transformer en substances biochimiques. Au contraire, la respiration et les fermentations dégradent les composés organiques en gaz carbonique (1).

La photosynthèse des plantes enlève environ 100 millions de tonnes de carbone/an de l'atmosphère sous forme de gaz carbonique. La respiration des plantes et des sols émet environ 50 millions de tonnes chaque année.

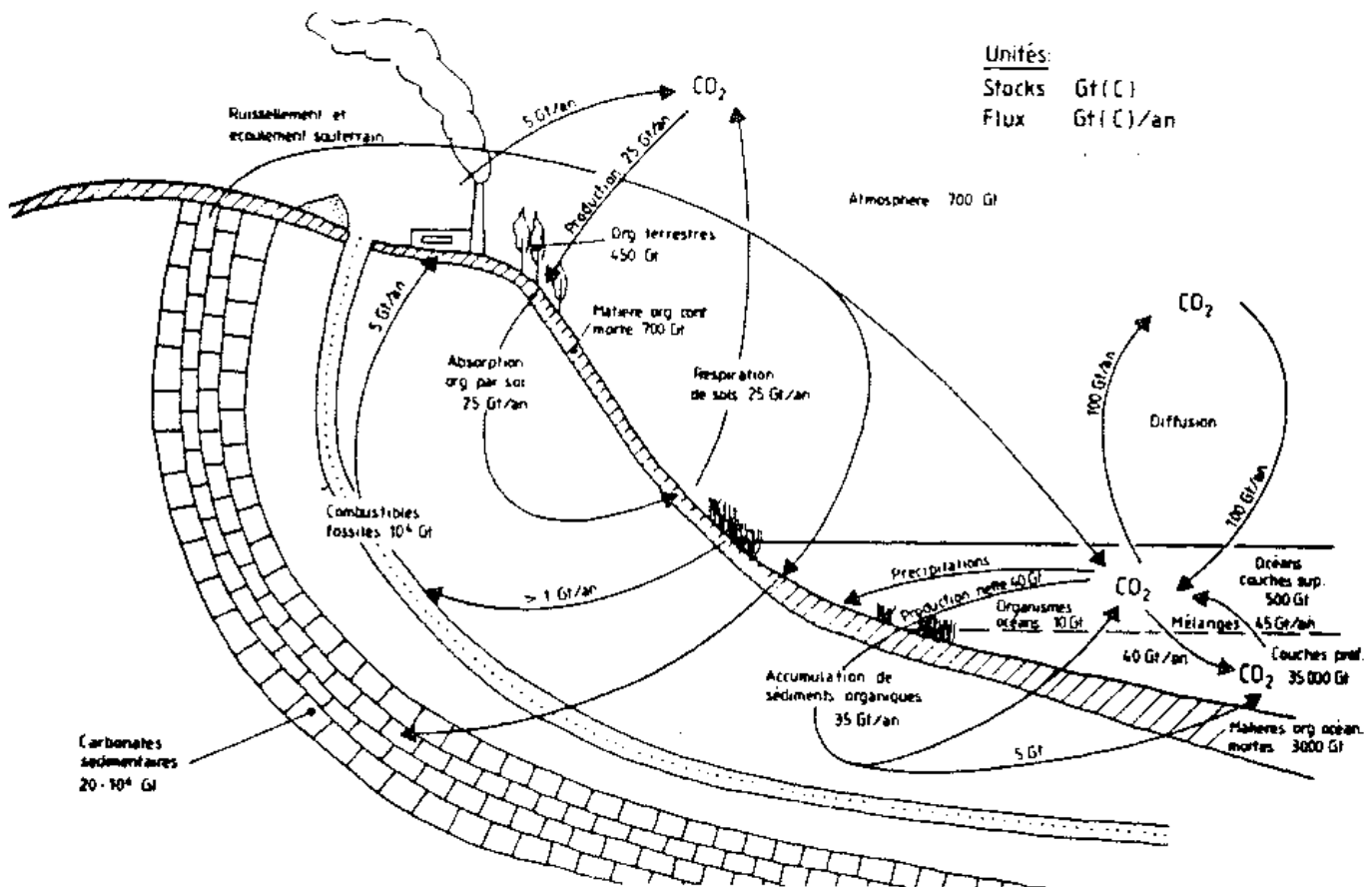
Les processus physicochimiques à la surface des océans libèrent eux environ 100 millions de tonnes dans l'atmosphère et absorbent environ 104 millions de tonnes.

Le carbone est le constituant de base de la matière organique et fournit actuellement plus de la moitié de l'énergie utilisée. Il est présent dans la nature sous deux formes minérales principales : à l'état de roches calcaires (carbonates sédimentaires) et à l'état gazeux (CO₂) qui constitue la forme circulante du carbone inorganique.

Les combustibles fossiles solides et liquides représentent des masses considérables de carbone organique mais dans les conditions naturelles constitue une forme non circulante dans le cycle du carbone. Le cycle du carbone dans ses différentes formes circulant entre atmosphère, lithosphère et hydrosphère est schématisé ci-dessous :

(1) F. RAMADE, *Éléments d'écologie, écologie fondamentale*, Mc Graw-Hill, 1984, p.244 et suivantes.

Cycle du carbone

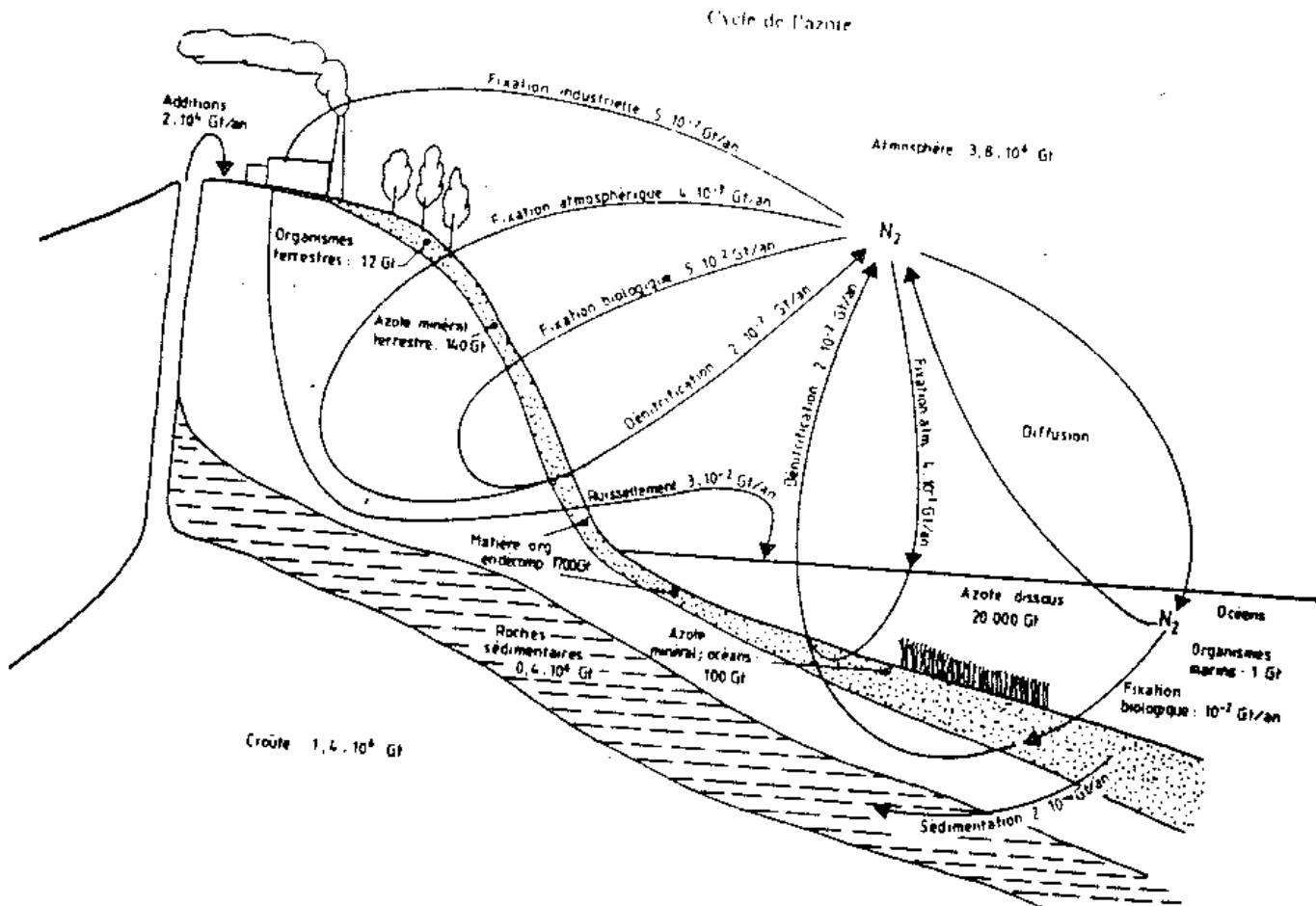


Source : " Le développement énergétique dans la dynamique de l'environnement " op. cité.

Le cycle de l'azote concerne environ $6 \cdot 10^6$ milliards de tonnes d'azote dont 70 % (% volumique) sont contenus dans l'atmosphère. Les deux processus impliqués dans la fixation de l'azote sont la fixation biologique dont le flux annuel s'établit à $5 \cdot 10^2$ milliards de tonnes et la fixation atmosphérique beaucoup moins importante. Celle-ci n'intervient que marginalement lors des orages (éclairs) durant lesquels de faibles quantités d'azote sont fixées en NO ou NO₂ (oxyde d'azote et dioxyde d'azote) ou encore accompagne les phénomènes de volcanisme.

Constituant principal de l'atmosphère, l'azote est fixée dans la matière organique en passant à l'état de nitrate (NO₃) par le processus biologique.

Il y a inversement une dénitrification (réduction des nitrates en nitrites, puis en azote) qui opère dans des sols présentant un excès de nitrate. Les processus de nitrification et de dénitrification permettent de répondre aux besoins des écosystèmes.



Quantités d'azote intervenant dans le cycle de l'azote

Azote en circulation	
N_2 organique	GT
Organismes terrestres	12
Organismes marins	1
Matières organiques en décomposition	1 700
N_2 inorganique	
sols	140
Sédiments marins	100
Total N_2 en circulation	environ 2 000
Azote fixe	
Atmosphère	$4 \cdot 10^6$
Océans	20 000
Roches sédimentaires	$0.4 \cdot 10^6$
Croûte terrestre	$1.4 \cdot 10^6$
Total N_2 fixe	environ $20 \cdot 10^6$ Gt

Source: " Le développement énergétique dans la dynamique de l'environnement, op. cité.

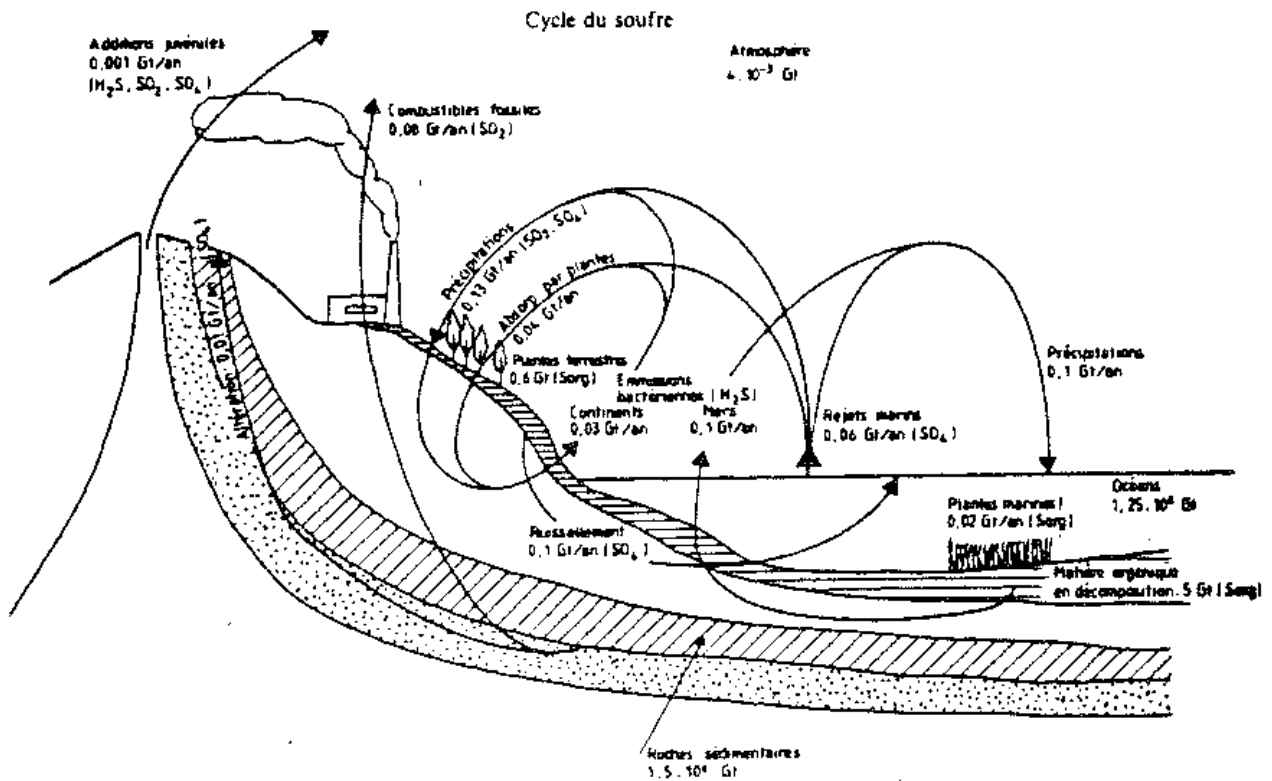
Le cycle du soufre s'opère sur des quantités totales de l'ordre de $2,7 \cdot 10^6$ milliards de tonnes stockées dans les roches sédimentaires et les océans.

Quantités de soufre

- atmosphère : 0,004 Gt
- océans : 1 250 000 Gt
- roches sédimentaires : 1 500 000 Gt
- Total $2,75 \cdot 10^6$ Gt

d'après G. SARLOS, P. VESTRAETE, opus cité.

Trois types de phénomènes biogéochimiques caractérisent ce cycle. Les rejets de sels marins s'effectuent dans l'atmosphère sous forme de sulfates (SO_4) à hauteur de 0,06 Gt/an. Un second flux de l'ordre de 0,1 Gt/an est constitué de SH_2 (hydrogène sulfuré) issu de l'action des bactéries sur les matières organiques. Les rejets volcaniques (0,001 Gt/an) émettent dans l'atmosphère des dérivés du soufre en quantités plus modestes. La majeure partie des émissions de soufre est transformée en ions SO_4 qui seront dissous en gouttelettes d'eau dans l'atmosphère.



Ces trois cycles biogéochimiques expriment à travers les flux qui les traversent les équilibres propres de la biosphère. Des échanges entre les différents composés chimiques et biologiques assurent ainsi dans le temps la stabilité des cycles.

Mais aux côtés des émissions naturelles, les émissions issues des activités énergétiques vont engendrer des perturbations au sein des trois cycles biogéochimiques. Ainsi, avec l'accroissement de la population mondiale et l'augmentation des besoins énergétiques à la base du développement économique, les équilibres biologiques sont profondément bousculés. D'une part l'extraction et d'autre part la transformation de l'énergie primaire impliquent des altérations physico-chimiques de la biosphère et plus particulièrement de l'atmosphère de la planète.

Concernant le cycle du carbone, il est perturbé par les rejets de CO₂ dans l'atmosphère issus de l'usage des combustibles fossiles. Ces gisements qui recèlent plus de 70 % de carbone (charbon, pétrole, gaz) libèrent leur carbone dans l'atmosphère lors de la combustion. Le tableau suivant indique à travers les quantités de CO₂ émises par la combustion des ressources fossiles une tendance à l'augmentation très importante de ces rejets.

CO₂ produit par la combustion des dérivés fossiles du carbone (en 10⁹ t de CO₂/an)

ANNEE	CHARBON	LIGNITE	PETROLE	GAZ NATUREL	TOTAL
1950	3,70	0,90	1,40	0,40	6,40
1960	5,00	1,40	3,10	1,00	10,50
1970	6,70		7,80	3,00	17,50
1980	11,10		10,80	4,00	26,00

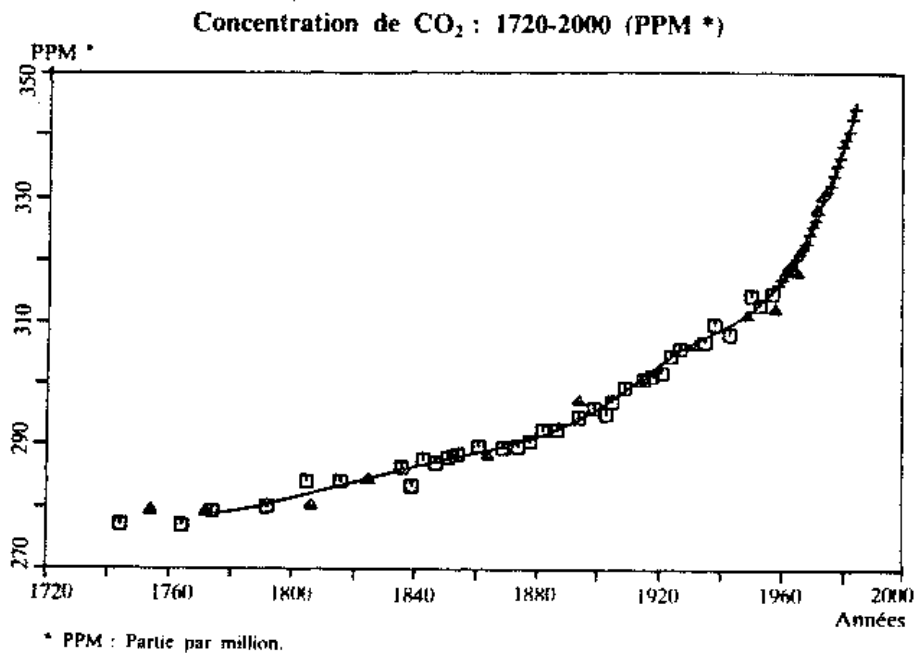
Source : F. RAMADE, *Ecologie des ressources naturelles*, Masson, 1981, p.103.

En trente ans, les rejets de CO₂ issus de la combustion des ressources fossiles ont été multipliés par 4. Sur la période 1971-1988, les émissions mondiales de CO₂ dues à l'utilisation énergétique sont passées de 4380 millions de tonnes de carbone à 6256, soit une progression de plus de 40% en 17 années. (1)

(1) OCDE, *Indicateurs d'environnement*, 1991, p.17.

On considère aujourd'hui que environ 6 Gt d'équivalent carbone sont ainsi rejetées dans l'atmosphère sous forme de CO₂ (soit 22 Gt/an de CO₂). Ils représentent le quart de l'absorption de gaz carbonique par les végétaux (25 Gt) ce qui n'est pas sans conséquence sur le cycle du carbone. (1)

Seulement la moitié des 6 Gt rejetés est absorbé par les océans et les végétaux, l'autre moitié demeure dans l'atmosphère. Ainsi le teneur en gaz carbonique dans l'atmosphère est en constante augmentation depuis plus de deux siècles.



Source : A. COMOLET, " Le réchauffement global de la planète ", Futuribles, février 1988.

Cette concentration est passée de 275 ppm en 1800 à 345 ppm en 1985. La hausse de 70 ppm représente un apport de 350 Gt de CO₂ en 185 ans ; apport constituant la part de gaz carbonique qui reste dans l'atmosphère. Actuellement, avec un rejet annuel de 6 Gt d'équivalent carbone sous forme de gaz carbonique, l'accroissement annuel de la concentration de gaz carbonique est de l'ordre de 0,5 %, ce qui n'est pas négligeable : + 1,5 ppm par an. Les 350 ppm de CO₂ sont aujourd'hui dépassés. Un autre composé du carbone contenu dans l'atmosphère est émis par les activités énergétiques. Il s'agit de l'oxyde de carbone (CO). Une des principales sources d'émanation de ce gaz est constituée par les moteurs à essence.

(1) G. SARLOS, P. VERSTRAETE, "Le développement énergétique dans la dynamique de l'environnement", *Revue de l'énergie*, août-septembre 1989, p.655.

Selon une estimation pour l'année 1968, les 3/4 des émissions de CO étaient dues aux véhicules (1). Deux autres activités contribuent à l'augmentation du CO atmosphérique : la combustion du bois et la combustion du charbon.

Seulement une partie du CO émis par l'ensemble de ces activités est transformée en gaz carbonique par oxydation dans l'atmosphère. Aussi, alors que dans les conditions naturelles, l'oxyde de carbone se rencontre dans des taux en moyenne évalués à 0,1 - 0,2 ppm, dans des zones d'activités intenses, la concentration moyenne atteint une vingtaine de ppm (2). Les rejets de CO sont ainsi considérables : * les processus naturels produisent une centaine de millions de tonnes par an de CO alors que les combustions, surtout les moteurs à essence, en dégagent quelques 300 millions de tonnes par an (3).

L'emploi sans cesse accru de combustibles fossiles par la société industrielle depuis plus d'un siècle a ainsi perturbé le cycle biogéochimique du carbone. Depuis le début du quaternaire et jusqu'à l'industrialisation, ce cycle était parfait : un équilibre dynamique existait entre les quantités de gaz carbonique dégagées dans l'atmosphère et les quantités extraites de l'atmosphère.

Les processus antagonistes de la respiration et de la photosynthèse assuraient une constance quasi absolue de la teneur en CO₂ atmosphérique. Avec les rejets de CO₂ dans l'atmosphère provoqués par la combustion des ressources fossiles, il apparaît un déséquilibre profond entre les processus de photosynthèse et de respiration: la respiration et le gaz carbonique rejeté surcompense la quantité de gaz carbonique retirée de l'atmosphère par la photosynthèse. Cela d'observe depuis 1850, date à laquelle l'homme issu de la révolution industrielle a commencé à consommer les stocks de combustibles fossiles (4).

Les deux flux végétation-atmosphère et océan-atmosphère sont modifiés par ces perturbations et partiellement les compensent. Cependant, des quantités en excès de gaz carbonique demeurent inéluctablement en dehors du cycle qui ne parvient pas à les assimiler. Il faut ajouter que les activités énergétiques ne sont pas les seules à contribuer à l'élévation de la concentration en gaz carbonique. En effet, la déforestation implique d'importants rejets de gaz carbonique. Malgré les incertitudes relatives à la quantité de carbone libérée lors de la destruction des forêts à l'état de gaz carbonique, les émissions mondiales sont évaluées à 1,8 + / - 0,8 milliard de tonnes de carbone.

(1) F. RAMADE, *Eléments d'écologie appliquée*, Mc Graw-Hill, 1976, p.169.

(2) opus cité, p.169.

(3) F. RAMADE, *Ecologie des ressources naturelles*, Masson, 1981, p.100.

(4) F. RAMADE, opus cité, p.102.

Cela concerne les forêts tropicales qui sont depuis plusieurs décennies les forêts concernées par la déforestation. (1)

Les forêts jouent donc un rôle crucial dans le cycle du carbone. Ainsi depuis 1860, la déforestation aurait contribué à l'accroissement du gaz carbonique de 90 à 180 milliards de tonnes, contre un accroissement de 150 à 190 milliards de tonnes issues de la combustion du pétrole, du charbon et du gaz naturel (2). Selon cette étude, la disparition des forêts tropicales implique chaque année un surplus de 1 à 2,6 milliards de tonnes de carbone dans l'atmosphère. On retrouve ici la même estimation que précédemment.

La déforestation et la combustion sont intervenues à part égale dans l'augmentation de CO₂ cumulée sur la période 1860 - 1980. Cependant, la croissance de la teneur en CO₂ dans l'atmosphère s'explique pour 80 % par la combustion des ressources fossiles aujourd'hui, contre seulement 20 % pour la déforestation (3).

Les émissions issues de la combustion des ressources fossiles sont donc un facteur majeur de perturbation du cycle du carbone dont les flux sont déséquilibrés de quelques pourcents.

Le flux de carbone émis par les ressources fossiles représente 3 % de l'ensemble des flux générés par le cycle du carbone dans la nature (à peine 1 % pour le flux de carbone issu de la déforestation). La résultante de cet excès est une hausse incessante de la concentration de gaz carbonique dans l'atmosphère dont nous verrons plus loin ses effets. Au niveau du cycle du carbone, on observe ainsi un gain net de 3 milliards de tonnes de carbone par an rejeté dans l'atmosphère, déduction faite donc des échanges entre biomasse-atmosphère et océan-atmosphère (4).

Le cycle de l'azote est encore plus affecté par les activités anthropogènes puisque la fixation industrielle est aussi importante que la fixation biologique : 50 millions de tonnes d'équivalent azote par an (5). Selon cette étude, les engrais azotés et la combustion des ressources fossiles interviennent dans la fixation industrielle de l'azote respectivement pour 2/3 et 1/3.

(1) P-H BOURRELIER, F. DIETRICH, *Le mobile et la planète ou l'enjeu des ressources naturelles*, Economica, 1989, p.216.

(2) S. POSTEL, L. HEISE, "Reforestation of the earth", *Economic impact*, 1988/4, n°65, p.18.

(3) J-C HOURCADE, G. MEGIE, J. THEYS, "Le bouleversement des climats, comment gérer l'incertitude ?", *Futuribles*, mai 1989, p.6.

(4) R.A. HOUGHTON, G.M. WOODWELL, "Global climatic change", *Scientific american*, avril 1989, vol. 260, p.20.

(5) G. SARLOS, P. VERSTRAETE, opus cité, p.656.

Une autre estimation (1) diffère sensiblement. Les activités énergétiques - combustion - émettent 24 millions de tonnes d'équivalent azote par an contre 53 pour la production d'engrais azotés. Le total dans ce cas s'élève à près de 80 millions de tonnes par an d'équivalent azote issu des activités industrielles. Les écarts entre ces estimations toutes deux récentes sont donc importants.

On considère que les émissions résultant de la combustion des ressources fossiles sont de $20,5 \pm 3,5$ millions de tonnes d'équivalent azote par an. Leur combustion libère ainsi des quantités importantes d'oxydes d'azote (NO et NO₂) (2) dans l'atmosphère. Ces composants chimiques sont des constituants normaux de l'atmosphère. Leur stabilité est assurée par les processus de fixation de l'azote et de dénitrification qui s'opèrent au sein du cycle de l'azote.

Or, l'importance des rejets issus de la combustion des ressources fossiles perturbe l'équilibre du cycle de l'azote. Les processus biogéochimiques tentent de transformer et d'enlever les composés azotés ainsi introduits par l'homme dans l'atmosphère. On constate cependant que le processus de fixation de l'azote l'emporte sur la dénitrification. La combustion des ressources fossiles implique un excès de fixation de l'azote. Les oxydes d'azote séjournant en moyenne 3 jours dans l'atmosphère, se transforment au contact de la vapeur d'eau contenues dans l'atmosphère en acides nitreux (HNO₂) et nitrique (HNO₃). Les nitrates ainsi formés sont ensuite ramenés au sol par les précipitations et constituent donc un surplus étranger au cycle de l'azote.

L'accumulation de nitrates qui en résulte dans le sol tout comme l'accroissement d'acides nitreux et nitrique dans l'atmosphère ont des effets très négatifs sur les milieux terrestre et aquatique (acidité des pluies, contamination des nappes aquifères). Le cycle de l'azote est donc perturbé par les émissions d'oxydes d'azote qu'il ne peut entièrement assimiler et qui donc s'accumulent.

Alors que la concentration des oxydes d'azote est normalement comprise en 0,5 et 4 ppb, elle peut excéder 0,1 ppm dans des zones d'activité industrielles intenses (3).

La concentration des oxydes d'azote est donc variable localement selon les conditions d'exploitation et de transformation des combustibles fossiles. Une estimation au niveau de la biosphère

(1) P-H BOURRELIER, R. DIETRICH, opus cité, p.29.

(2) NO est l'oxyde azotique. NO₂ est le peroxyde d'azote encore appelé selon la terminologie anglo-saxonne "dioxyde d'azote".

(3) F. RAMADE, *Éléments d'écologie appliquée*, Mc Graw-Hill, 1976, p.177.

a donc une portée limitée.

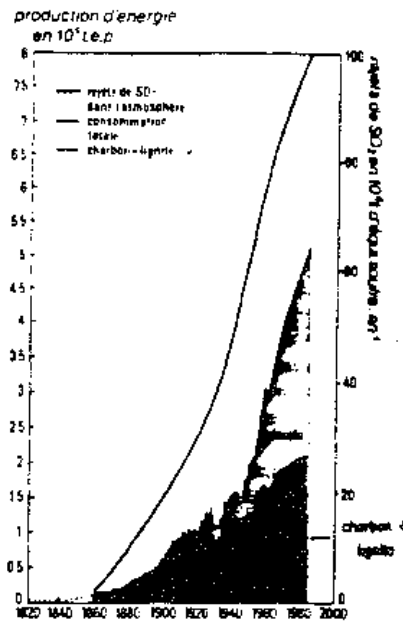
Une autre source d'émission d'oxydes d'azote est constituée par les moteurs à essence. Plus négligeable que la combustion de ressources fossiles, elles devrait intervenir de façon croissante compte tenu de l'accroissement du nombre de véhicules à l'échelle planétaire. Dans la mesure où l'oxyde azotique se transforme rapidement en dioxyde d'azote dans l'atmosphère, cette somme d'émission contribue de facto à l'accroissement de la teneur en gaz carbonique atmosphérique dans les zones urbaines.

Autre dérivé nitré en quantité croissante dans l'atmosphère, l'oxyde nitreux N₂O intervient dans le cycle de l'azote. Il existe dans l'atmosphère en grande quantité et est issu de l'action de micro organismes dans les sols et l'eau. L'utilisation des énergies fossiles est un facteur responsable de l'accroissement des quantités émises de ce gaz. Annuellement, sur les 15 millions de tonnes émises, 25 % sont liées aux processus énergétiques (combustion des fuels et de la biomasse) ; 60 % sont d'origine naturelle (1). Comme l'oxyde nitreux réside environ 70 ans dans l'atmosphère, les émissions observées actuellement ne reflètent qu'une part de son abondance totale. Ainsi, même à émissions constantes, sa concentration relative ne peut qu'augmenter dans les prochaines décennies. Actuellement, la concentration en N₂O augmente au rythme annuel de 0,4%.

Enfin, le cycle du soufre est fortement affecté par la combustion des ressources fossiles. Ces ressources contiennent jusqu'à 6 % de soufre qu'elles libèrent en brûlant sous forme d'anhydride sulfureux (SO₂) et d'anhydride sulfurique (2) (SO₃). Avec l'accroissement de la consommation mondiale de combustibles fossiles, les émissions d'oxydes de soufre n'ont cessé de s'accroître.

(1) J-C HOURCADE, G. MEGIE, J. THEYS, opus cité, p.8.

(2) Le SO₂ se transforme en SO₃ au contact de l'air ; ce dernier se transforme au contact de la vapeur d'eau atmosphérique en acide sulfurique.



Source : F. RAMADE, Les catastrophes écologiques, Mc Graw-Hill 1987, p. 186.

Les quantités de soufre libérées dans la biosphère sont considérables : 80 millions de tonnes par an. 50 millions de tonnes sont rejetées à la surface de la terre et 30 millions de tonnes dans les océans (1). Ce flux est plus important que les flux naturels observés au sein du cycle du soufre : 80 fois plus important que le flux issu des rejets volcaniques ! A lui seul, il représente une masse équivalente à celle de l'hydrogène sulfuré rejeté par les seules émissions bactériennes. L'anhydride sulfureux est quasiment absent dans l'atmosphère. Les rejets issus de l'utilisation des charbons et des fuels lourds représentent des excès par rapport au cycle du soufre. Ce dérivé du soufre se transforme rapidement (2 à 4 jours) dans l'atmosphère en acide sulfurique puis en sulfates. L'acide sulfurique et les sulfates formés sont ramenés au sol par les précipitations.

En dégageant des quantités considérables de soufre, la combustion des ressources fossiles contribue à déstabiliser le cycle biogéochimique du soufre. Les quantités supplémentaires d'acide sulfurique et de sulfates induites par l'émission de soufre ne sont pas assimilées par les processus qui régulent les transformations chimiques des composés du soufre.

Les activités énergétiques perturbent gravement les flux naturels du cycle du soufre. L'homme est le seul responsable de la majorité du SO₂ qui se dégage dans l'atmosphère.

(1) G. SARLOS, P. VERSTRAETE, opus cité, p.657.

Nous pouvons résumer dans un tableau les interférences entre les activités énergétiques et les cycles biogéochimiques :

CYCLE BIOGEOCHIMIQUE	COMPOSANTE DE L'ENVIRONNEMENT	SOURCE D'EMISSION ORIGINE ENERGETIQUE	FLUX ANNUEL LIBERE (en millions de tonnes)
Cycle du carbone	gaz carbonique CO ₂	combustion ressources fossiles	Equivalent carbone 6000
	oxyde de carbone CO	combustions du charbon, du bois moteurs à explosion	300
Cycle de l'azote	oxydes d'azote NO, NO ₂ , NO ₃	combustion ressources fossiles moteurs à essence	Equivalent azote 24
	oxydes nitreux NO ₂	combustion ressources fossiles et biomasse	6
Cycle du soufre	oxydes de soufre SO ₂ , SO ₃	combustion ressources fossiles	Equivalent soufre 100

Tableau réalisé par l'auteur

Combustible fossiles : pétrole, gaz naturel et charbon

Les estimations chiffrées sont issues de la synthèse des études suivantes :

- J.C HOURCADE, G.MEGIE, J. THEYS, Le bouleversement des climats,
- F. RAMADE, Ecologie de ressources naturelles,
- G. SARLOS, P. VERSTRAETE, Le développement énergétique dans la dynamique de l'environnement,
- P.H. BOURRELIER, R. DIETRICH, Le mobile et la planète ou l'enjeu des ressources naturelles.

Les activités énergétiques perturbent fortement les cycles où la phase gazeuse est prédominante. En intervenant au niveau de l'atmosphère de la planète, elles modifient sa composition chimique et affectent directement certaines de ses composantes . Nous avons déjà étudié quelques uns de ces éléments en soulignant l'importance relative des variations induites par la

combustion des énergies fossiles. Une autre composante de l'atmosphère connue depuis 1940 est concernée par l'exploitation des combustibles fossiles (1). Il s'agit du méthane.

Demeurée constante jusqu'en 1700, la concentration relative en méthane croît de manière exponentielle. Depuis une dizaine d'années, elle augmente à un rythme annuel de l'ordre d'1%. Chaque année, environ 320 millions d'équivalent carbone (420 millions de méthane) sont émis. En 1980, 35% des émissions de méthane étaient imputables aux processus énergétiques (2). La combustion de la biomasse libère à elle seule entre 30 et 110 millions de tonnes de méthane. Le transport du gaz naturel au sein des gazoducs injecte entre 40 et 80 millions de tonnes de méthane dans l'atmosphère. Les forages pétroliers, l'exploitation des mines de charbon impliquent aussi des émissions substantielles de méthane atmosphérique.

Cependant, l'évolution de la concentration de méthane dans l'atmosphère dépend essentiellement de l'augmentation de la population humaine ; plus précisément des activités agricoles. Le méthane est produit dans la nature à partir des rizières, des élevages d'herbivores et des marécages. L'extension des cultures inondées et l'accroissement du nombre d'animaux domestiques (ruminants) depuis le début de l'ère industrielle a eu pour effet de libérer des quantités supplémentaires de méthane dans l'atmosphère.

Nous considérons donc que le méthane libéré par la production de sources fossiles n'intervient que pour une faible part dans l'évolution exponentielle de la concentration de méthane, évolution qui est plus expliquée par l'extension des activités agricoles que par un recours conséquent aux ressources fossiles depuis 1850. L'extraction des combustibles fossiles et le transport du gaz naturel contribueraient aux émissions globales de méthane à hauteur de 10%. (3)

Il semblait néanmoins opportun de souligner ce point concernant le méthane dans la mesure où il est inévitablement concerné par les ressources fossiles. De plus, si on considère l'évolution de la population mondiale, les besoins énergétiques vont nécessairement augmenter et donc impliquer des quantités plus importantes de méthane dans l'atmosphère. Cette relation d'interdépendance pourrait ainsi se renforcer et occuper une place majeure dans la perturbation de l'équilibre chimique de la biosphère au sein de l'atmosphère.

(1) J-C HOURCADE, G. MEGIE, J. THEYS, opus cité, p.8.

(2) en incluant la combustion de la biomasse.

(3) I. MINTZER, "A warming world : challenges for policy analysis", *Economic impact*, 1988/4, n°65, p.9.

Le système énergétique dans sa composante non renouvelable modifie profondément les équilibres naturels de la biosphère via les cycles biogéochimiques.

L'atmosphère représente la principale source d'approvisionnement en carbone, azote et soufre pour de nombreux écosystèmes terrestres et aquatiques. Elle est donc un maillon essentiel des cycles biogéochimiques relatifs à ces trois composés. Les processus biologiques régulent en grande partie leur abondance naturelle et maintiennent ainsi l'équilibre chimique de l'atmosphère.

Cependant, face à l'action humaine, comment la biosphère réagit-elle? Quelle est sa capacité d'adaptation aux perturbations imposées par le système énergétique?

C'est l'objet du point suivant que nous allons maintenant aborder en dégageant de manière précise les possibilités de réponse et les limites inhérentes à l'appartenance de la biosphère à l'univers physique.

B - Les réactions homéostatiques de la biosphère ou la réponse de la biosphère aux perturbations du système énergétique

L'équilibre naturel de la biosphère résulte d'interactions nombreuses entre les trois compartiments physiques qui la composent, à savoir la lithosphère (ensemble des continents émergés), l'hydrosphère (océan mondial) et l'atmosphère (couche gazeuse homogène). A travers les différents cycles biogéochimiques, la biosphère tente de maintenir la stabilité de ses composantes.

Depuis l'origine de sa formation, son existence implique celle d'une écosphère telle que la définit F.RAMADE : "une planète pourvue d'une atmosphère de composition convenable et au niveau de laquelle le flux d'énergie produit par l'étoile autour de laquelle elle gravite, présente une densité de valeur compatible avec celle qu'exige le développement des formes vivantes"(1). La biosphère que nous connaissons aujourd'hui est différente de celle qui existait à l'origine de la vie. L'influence permanente des organismes vivants sur les éléments minéraux est à l'origine des compositions actuelles de la lithosphère de l'hydrosphère et de l'atmosphère ; influence qui s'est prolongée pendant toute la durée des temps géologiques. Du point de vue évolutif, la biosphère apparaît donc comme le résultat d'une combinaison de circonstances fa-

(1) F. RAMADE, *Eléments d'écologie, écologie fondamentale*, Mc Graw-Hill, 1984, p.2.

variables de nature cosmique, géophysique et géochimique.

En affectant les cycles biogéochimiques, l'activité de l'homme modifie la composition de la biosphère et, principalement celle de l'atmosphère terrestre. Qu'il s'agisse du cycle du carbone ou de celui du soufre, l'accroissement de certaines de leurs composantes chimiques induit par l'extraction-utilisation de ressources fossiles déséquilibre les flux d'échange lithosphère-hydrosphère-atmosphère.

Des facteurs homéostatiques qui jouaient un rôle régulateur au sein de l'équilibre de la biosphère avant l'ère industrielle semblent aujourd'hui inopérants, ou du moins limités dans leur champ d'action. Nous allons voir à présent quelles sont les différentes réactions homéostatiques de la biosphère, comment celle-ci s'adapte aux perturbations que lui imposent les activités énergétiques.

Au sein du cycle du carbone, les facteurs homéostatiques qui maintenaient constant le taux de gaz carbonique dans l'atmosphère n'interviennent plus de façon efficace. Nous avons ainsi pu constater un accroissement de la concentration atmosphérique de gaz carbonique résultant de la combustion des énergies fossiles. Tandis qu'il était stable jusqu'en 1850, il s'accroît de manière exponentielle depuis. Or, si la teneur en gaz carbonique a fortement varié (de plus de 80%) durant les transitions climatiques ; cette variation importante ne s'observait que sur plusieurs milliers d'années (1). De plus, la concentration maximale était de 280 ppm contre 350 ppm aujourd'hui.

La dernière transition qui s'est opérée entre une période glaciaire il y a 18 000 ans et l'âge interglaciaire s'est accompagné d'une hausse de près de 50% du contenu en CO₂ atmosphérique, sur une durée d'environ 5000 ans. Des variations en CO₂ très importantes ont ainsi eu lieu au sein de l'atmosphère terrestre mais à des échelles de temps géologiques (2).

Or, depuis près de deux siècles, la modification de la composition chimique de l'atmosphère et de la concentration relative de constituants essentiels au maintien de la vie sont le fait des activités principalement énergétiques, activités qui sont générées à l'échelle humaine.

L'équilibre du cycle du carbone est rompu. Pour comprendre comment cette rupture d'équilibre peut être neutralisée partiellement par la biosphère, ou va considérer les flux d'échanges entre les différents réservoirs de l'écosphère susceptibles d'accumuler le CO₂ : l'océan et la biomasse. Les volumes de ces deux réservoirs ont une action homéostatique sur le taux de gaz

(1) J-C HOURCADE, G. MEGIE, J. THEYS, opus cité, p7.

(2) G. MEGIE, "Changement de la composition chimique de l'atmosphère et effet "retard"", *Economie et humanisme*, n°308, juillet-août 1989, p.32.

carbonique atmosphérique issu des combustions de ressources fossiles.

Ainsi, tout le gaz carbonique d'origine énergétique rejeté dans l'atmosphère est en partie extrait : sur plus de 7 milliards de tonnes d'équivalent carbone ainsi émises, seulement 3,2 milliards de tonnes demeurent dans l'atmosphère ; la différence de l'ordre de 4 milliards de tonnes d'équivalent carbone est donc absorbée par l'océan et par la biomasse (1).

L'océan apparaît de loin comme le principal réservoir de carbone avec 38000 Gt de carbone inorganique. Il dissout une grande partie du gaz carbonique émis par les combustions et semble constituer le seul réservoir susceptible d'extraire efficacement le CO₂ en excès. Ce réservoir potentiel joue un rôle dans la régulation du CO₂ atmosphérique. Ainsi, on a estimé que, depuis 1950, 49 +/-12% du CO₂ produit par les combustions est resté dans l'atmosphère, la différence ayant été absorbée par l'océan (2).

L'accroissement des échanges atmosphère-océan permet de compenser partiellement l'augmentation du CO₂ atmosphérique. Cependant, la capacité d'absorption de l'océan est limitée dans le temps. Il existe une limite pour la vitesse à laquelle le gaz carbonique rejeté dans l'air par les combustions énergétiques est finalement absorbé par le réservoir océanique (3). Au fur et à mesure que le gaz carbonique atteint les couches profondes (200 à 400 mètres) de l'hydrosphère, la diffusion de cet excès de CO₂ devient plus lente ; ce temps de diffusion est de l'ordre de plusieurs années.

Ainsi, en 1950, tandis que 64% du CO₂ d'origine énergétique s'était accumulé dans les couches superficielles de l'océan, seulement 25% était accumulé dans les abysses. Les échanges de CO₂ entre les eaux de surface et les eaux profondes durent plusieurs dizaines d'années. Cette lenteur de dissolution du gaz carbonique dans l'océan explique en partie l'accroissement constaté de la concentration de CO₂ atmosphérique.

L'océan ne peut donc absorber sur de courtes périodes les quantités de CO₂ émises par les activités énergétiques. Aussi, comme l'explique F.RAMADE, "le réservoir réellement accessible au gaz carbonique d'origine industrielle est de volume nettement plus faible que celui du réservoir potentiel" (4).

(1) G. BENHAMOU, "CO₂ : les chercheurs font les comptes", *Science et avenir*, mars 1990, p.28.

(2) F. RAMADE, *Ecologie des ressources naturelles*, Masson, 1981, p.108.

(3) F. RAMADE, *Éléments d'écologie appliquée*, Mc Graw-Hill, 1976, p.225.

(4) opus cité, p.225.

Compte tenu de l'accroissement exponentiel de la concentration en CO₂ atmosphérique, les processus régulateurs opérant au niveau atmosphère-océan ne pourront donc compenser les quantités de CO₂ rejetées par les activités énergétiques dans les années à venir. Les temps de réponse longs autorisent la prise en compte de l'hypothèse d'une saturation à terme du réservoir océanique (1).

A côté de l'océan, la biomasse constitue le second réservoir potentiel pour l'accumulation du CO₂ en excès. La biomasse intervient comme facteur d'équilibre : avec l'élévation de la teneur atmosphérique en CO₂ la photosynthèse augmente et donc fait décroître l'excès de CO₂ issu des activités énergétiques.

Sous l'effet du gaz carbonique ainsi émis, la croissance végétale est stimulée et la biomasse incorpore alors plus de carbone atmosphérique. Toutefois, la stimulation de la photosynthèse par l'augmentation de la teneur en CO₂ dans l'atmosphère apparaît comme une réaction homéostatique de moindre importance. Dans la mesure où l'augmentation de la production primaire induite par les rejets de CO₂ d'origine humaine(2) ne compense pas ces rejets en les incorporant dans la biomasse, on peut s'interroger sur le rôle significatif de la biomasse dans la régulation du CO₂ atmosphérique (3).

D'après F. RAMADE, l'augmentation du stockage de carbone au sein de la biomasse induite par ces excès de CO₂ serait de l'ordre de 220 millions de tonnes de carbone par an. Or, cela est nettement inférieur à l'injection de CO₂ dans l'atmosphère résultant de la combustion des énergies fossiles et de la déforestation. Les émissions de carbone issues de la seule déforestation sont 10 fois plus importantes que l'absorption de carbone induite par le CO₂ en excès ! (le facteur est de près de 30 pour les activités énergétiques).

Le réservoir biomasse a donc une capacité limitée dans l'accumulation du CO₂ issu des activités énergétiques. Dans de telles conditions, en l'absence d'un arrêt immédiat de la destruction des forêts et d'un usage limité des combustibles fossiles, le cycle biogéochimique du carbone ne peut rétablir son équilibre.

Bien que le réservoir océanique joue un rôle majeur dans la régulation du CO₂ atmosphérique, il demeure très limité compte tenu de la vitesse de diffusion de ce gaz émis dans l'atmosphère par les activités énergétiques.

(1) J-C HOURCADE, G.MEGIE, J. THEYS, opus cité, p.10.

(2) Activités énergétiques et déforestation.

(3) F. RAMADE, *Ecologie des ressources naturelles*, Masson, 1981, p.109.

Concernant le cycle de l'azote, le taux d'oxyde nitreux contenu dans l'atmosphère s'accroît sans que les processus biogéochimiques ne parviennent à rétablir l'équilibre. Le processus de fixation de l'azote et la dénitrification ne se compensent plus. La fixation de l'azote résultant de la combustion des ressources fossiles est une des causes de la destabilisation des quantités d'oxyde d'azote présentes dans l'atmosphère. Les acides nitreux et nitrique produits dans l'atmosphère s'accumulent à leur tour et sont libérés dans le sol sous forme de nitrates avec les précipitations.

La concentration en oxydes nitreux devrait continuer à augmenter dans la mesure où elle est fonction du couple (temps écoulé, taux d'émission). Cela résulte de la longue vie de l'oxyde nitreux (plusieurs décennies). Cela suppose que le processus de fixation de l'azote continue à l'emporter sur celui de la dénitrification. La "surproduction" de l'ensemble des dérivés de l'azote n'est donc pas absorbée au sein du cycle biogéochimique de l'azote. Issue des activités énergétiques relatives principalement aux ressources fossiles, elle contribue à la pollution atmosphérique de la planète.

L'équilibre du cycle de l'azote ne pourra être atteint que très lentement compte tenu du temps de séjour très long dans l'atmosphère de certains gaz tels les oxydes nitreux. Ainsi, des temps de réponses importants (plusieurs décennies) séparent les causes - émissions énergétiques - des conséquences - manifestation d'effets multiples au sein de la biosphère (1).

Au sein du cycle du soufre, les émissions de CO₂ induites par la combustion d'énergies fossiles demeurent en dehors des phénomènes homéostatiques qui le régulent. L'introduction supplémentaire de soufre dans l'atmosphère contribue à l'élévation de l'acidité des eaux de pluie dans des zones fortement industrialisées. Il y a deux siècles, les précipitations concernant l'Europe et l'Amérique du Nord avaient un PH voisin de 6 - 7,6 (PH neutre) ; il est systématiquement inférieur à 5,6 aujourd'hui (2).

Le cycle du soufre qui est bouclé par l'existence d'échanges dans le sens des continents et hydrosphère vers l'atmosphère est déséquilibré. Ce cycle qui aboutit à l'accumulation continue de soufre dans les sédiments profonds, ceux-ci constituant la réserve principale de soufre dans la biosphère, ne neutralise pas l'excès de sulfates dans l'atmosphère, sulfates ramené au sol par les précipitations. D'où élévation du PH des eaux de pluies et des eaux continentales.

(1) G. MEGIE, opus cité, p.33.

(2) F. RAMADE, *Ecologie des ressources naturelles*, 1981, Masson, p.117.

Nous pouvons donc confirmer que les mécanismes d'autorégulation qui assurent les équilibres de la biosphère (biologique, chimique, thermique) sont relativement inopérants face à l'action de l'homme.

Les perturbations induites par les activités énergétiques sont par ailleurs d'autant plus importantes que leur vitesse de diffusion dépasse la vitesse d'adaptation de la biosphère. Au cours des dernières décennies, l'accélération induite par l'accroissement des besoins énergétiques a bouleversé et continue d'atteindre les équilibres d'écosystèmes jusque là épargnés. Les modifications de la composition chimique de l'atmosphère apparaissent irréversibles.

Nous allons à présent étudier les conséquences à moyen et long terme de ces perturbations pour la biosphère. Après quoi, nous tenterons d'apporter des réponses possibles à travers la dimension technologique et ses développements futurs. L'enjeu technologique existe et doit permettre une meilleure gestion des ressources énergétiques au sein des processus de production-transformation.

§ 3 - Les conséquences à l'échelle planétaire

Les répercussions sur la biosphère des activités énergétiques sont pour certaines d'ores et déjà visibles et mesurables tandis que d'autres sont déduites des observations et s'inscrivent dans des délais plus longs.

L'examen des effets immédiats induits par la combustion des ressources énergétiques révèle l'importance et la gravité des perturbations au sein de l'atmosphère et des écosystèmes terrestres et aquatiques. En premier lieu, la présence de quantités croissantes de gaz carbonique, d'oxydes d'azote (oxyde nitreux N₂O essentiellement) ainsi que de méthane dans l'atmosphère implique un réchauffement de celle-ci par effet de serre. Ces gaz créent un effet de serre en absorbant une partie du rayonnement solaire qui est réfléchi par la surface de la terre sous forme de radiations infrarouges et en le réémettant vers le sol.

Ils contribuent ainsi au réchauffement de l'atmosphère au niveau de la surface terrestre ; plus précisément au niveau de la basse atmosphère (troposphère). L'équilibre thermique de la terre est donc affecté par l'accroissement des concentrations de CO₂, N₂O et CH₄ dans l'atmosphère. Les échanges thermiques résultant du rayonnement solaire sont modifiés : l'équilibre est atteint par élévation de la température au sol.

De nombreux travaux ont été réalisés afin de fournir des estimations sur les rôles respectifs de ces composés chimiques dans le réchauffement de l'atmosphère de la planète. Nous pouvons ainsi rappeler leurs principales conclusions qui s'appuient toutes sur des estimations relatives à leurs concentrations futures résumées dans le tableau ci-dessous. Dans l'ensemble des études, il apparaît inévitable qu'en l'absence de tout changement d'option énergétique, les concentrations de ces gaz d'ici la fin du 21^{ème} siècle vont s'accroître. Il en résulte une élévation de la température de surface qui va se traduire par une modification des équilibres climatiques.

Gaz	Concentration préindustrielle (ppm)	Concentration 1980 (ppm)	Concentration 2030 (ppm)	Durée de vie (an)	Part de l'énergie dans les émissions
CO ₂	275	339	450	7	80 %
CH ₄	0,7	1,55	2,4	7 à 10	35 %
N ₂ O	0,28	0,3	0,4	150	25 %
CFC	0,0008	0,0015	0,006 à 0,010	= 100	négl.

Source : "Le bouleversement des climats", op.cité.

Dans le cas du gaz carbonique, on estime qu'un doublement d'ici 2040-2075 de sa teneur atmosphérique par rapport aux teneurs de l'ère préindustrielle, soit une concentration de 600 ppm environ, impliquerait une augmentation de la température de la planète de 3 degrés Celsius en moyenne ; compte tenu d'une marge d'incertitude de 1,5°C (1).

S'il est reconnu comme le principal responsable de l'effet de serre, il n'est pas le seul constituant de l'atmosphère terrestre à jouer un rôle. Nous ne traiterons pas de tous les autres composés responsables (2) mais de ceux issus de l'extraction-combustion des ressources énergétiques. Nous pouvons souligner cependant leur contribution majeure au réchauffement de la planète : le méthane, l'oxyde nitreux, l'ozone et les chlorofluorocarbones. Leur effet cumulé sur la température au sol est comparable à terme à celui du CO₂ : d'ici à 2050, leur contribution à l'effet de serre pourrait représenter l'équivalent d'un accroissement de la teneur en CO₂ de 150 ppm (3). Pour situer leur importance, rappelons que de 1880 à 1985, la teneur en CO₂ atmosphérique a augmenté de 50 ppm. Elle est passée de 295 ppm à 345 ppm. A l'heure actuelle, ils produisent sur le réchauffement un effet correspondant à la moitié de la contribution du CO₂.

Il existe cependant de nombreuses incertitudes relatives à la prévision des concentrations futures des constituants et finalement de leurs effets sur les équilibres de la biosphère. Concernant le cycle du carbone, nous avons pu constater comment les échanges atmosphère-océan-biomasse tendaient à rétablir l'équilibre et à réguler le CO₂ atmosphérique ; les réservoirs océan et biomasse y jouent un rôle essentiel.

(1) J-C HOURCADE, G. MEGIE, J. THEYS, "Le bouleversement des climats", *Futuribles*, mai 1989, p.11.

(2) A. COMOLET, "Le réchauffement global de la planète", *Futuribles*, février 1988, p.3-7.

(3) J-C HOURCADE, G. MEGIE, J. THEYS, opus cité, p.12.

Toutefois, les résultats concernant le CO₂ que traduisent les modèles climatiques doivent être considérés avec prudence : compte tenu de la complexité des interactions physico-chimiques, auront-elles un effet stabilisateur ou au contraire un effet amplificateur ? Une meilleure connaissance des mécanismes qui régulent les différents équilibres au sein de la biosphère est nécessaire. Pour le CO₂, le réservoir qu'est l'océan peut à terme être saturé. Dans le cas du méthane, une source d'incertitude dépend de l'évaluation du taux d'émission de chacun des écosystèmes et de leur dénombrement. Pour l'oxyde nitreux, les processus de fixation de l'azote et de dénitrification peuvent concerner une même surface, tout va dépendre des contextes.

Ainsi, si les prévisions relatives à l'évolution de la concentration de CO₂ atmosphérique sont relativement fiables, il en va tout autrement pour le CH₄ et le N₂O. Les processus d'émissions de méthane et d'oxydes nitreux ou encore de diffusion et de décomposition dans l'atmosphère ne sont pas parfaitement connus. Comme le souligne dans leur article les auteurs (1), les incertitudes inhérentes à l'estimation de ces gaz peuvent être relativisées en tenant compte de leur durée de vie propre. Ainsi, le gaz carbonique et le méthane dont les durées de vie sont courtes atteindront très vite une concentration d'équilibre, concentration proportionnelle à leur taux d'émission uniquement. Par contre, pour l'oxyde nitreux par exemple, du fait d'une durée de vie longue, il va s'accumuler dans l'atmosphère et son taux d'augmentation sera supérieur au taux d'émission futur ; sa concentration augmente alors proportionnellement au produit du taux d'émission par le temps écoulé.

Compte tenu de ces réserves, les effets attendus possibles d'un tel réchauffement seraient d'importance majeure. En premier lieu, on assisterait à une nouvelle distribution des climats au sein de la planète, distribution non homogène mais fonction de la latitude et de la longitude. Certaines régions seraient ainsi plus sèches et plus chaudes et d'autres plus humides (2). La hausse des températures entraînerait une augmentation de l'évaporation ainsi que de l'humidité de l'air et des précipitations ; les répercussions dépendant ici encore de la localisation des régions. Autre conséquence liée à cette évolution climatique induite par un réchauffement de 2 à 4° C de la température de surface de la terre en moyenne est l'élévation du niveau des mers résultant de l'expansion thermique des océans.

(1) J-C HOURCADE, G. MEGIE, J. THEYS, opus cité, p.15.

(2) En hiver, le pôle nord se réchaufferait de 10°C ; en été, le continent antarctique serait le plus touché avec des augmentations de 8 à 10° C, Science et avenir, mars 1990, p.33.

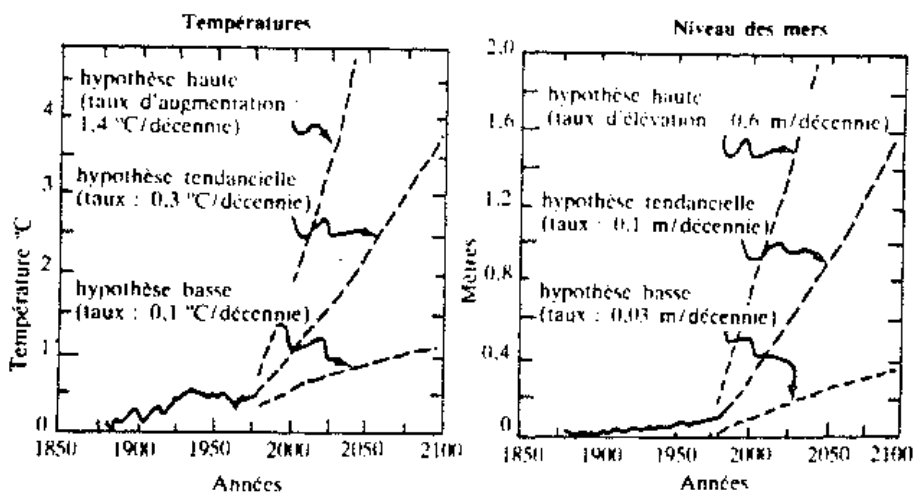
Cette élévation serait comprise dans une fourchette allant de 0,5 à 3 mètres dans le cas où la fonte des glaciers continentaux interviendrait avec l'expansion thermique des océans.

Cependant, selon certains spécialistes, le réchauffement ne permettrait pas la fonte des glaces de l'antarctique. Dans ce cas, pour une hausse moyenne des températures comprise entre 1,5 et 5,5° C, l'élévation du niveau des mers serait de 20 à 165 cm (1).

Quelque soit l'hypothèse retenue, un léger relèvement du niveau des mers conduirait à inonder des régions côtières de faible altitude (Pays Bas, Bangladesh) et contribuerait à leur érosion.

Il est clair que les estimations chiffrées varient en fonction des scénarios d'évolution des concentrations en gaz responsables de l'effet de serre. Les schémas ci-dessous sont révélateurs.

Élévation des températures et du niveau des mers
en fonction de différents scénarios d'évolution des concentrations
en gaz responsables de l'effet de serre



Source : Conférence de Bellagio. 9-13 Novembre 1987, in A.COMOLET, op.cité, p.9.

Du point de vue de l'élévation des températures, les rôles du gaz carbonique et du méthane sont essentiels. Les travaux réalisés au sein de la station Vostok (2) en antarctique conduisent à une conclusion majeure : dans les 160 000 années qui se sont écoulées (3), les fluctuations relatives

(1) A. COMOLET, opus cité, p.12.

(2) R.A.HOUGHTON, G.M. WOODWELL, "Global climatic change", *Scientific american*, avril 1989, p.21.

(3) dernier cycle climatique.

à la teneur atmosphérique en CO₂ et en CH₄ ont suivi de très près les variations de la température (1). Ainsi, plus la température est élevée et plus forte est la concentration en CO₂ ainsi qu'en CH₄. Lors de la dernière période de réchauffement de la planète, les concentrations relatives à ces deux gaz ont fortement augmenté : près de 50% pour le CO₂ près de 100% pour le CH₄. Cependant, si de telles variations se sont opérées sur 5 000 ans environ, les variations attendues pour le 21^{ème} siècle sont du même ordre pour une durée infime. Il y a une étroite interaction entre les cycles biogéochimiques et les variations climatiques. Les variations de la composition de l'atmosphère ont ainsi contribué de manière significative à l'amplitude des variations climatiques au cours du dernier cycle climatique.

Les modifications qui ont lieu depuis le milieu du 19^{ème} siècle sont le fait des activités énergétiques. Bien qu'il existe des incertitudes sur les changements climatiques qui résulteraient de telles activités, notamment l'ampleur des variations de températures selon les estimations, il est nécessaire de souligner que le système énergétique que nous connaissons dans les pays industrialisés et dont les pays en développement s'inspirent va naturellement renforcer la tendance à l'accroissement de la température moyenne de surface de la planète. Au cours du 20^{ème} siècle, cette température s'est déjà élevée de 0,3 à 0,7° C. Sur cette même période, le niveau moyen des océans s'est par ailleurs élevé de 12 cm \pm 5 cm (2).

Afin de ne pas sous-estimer les ruptures d'équilibre ou au contraire d'exagérer les effets des constituants de l'effet de serre, il faut être très prudent sur les chiffres avancés. Il nous semble plus important de considérer la rapidité des changements éventuels : ce n'est pas à l'échelle géologique qu'ils prendraient place mais bien à l'échelle humaine.

Les phénomènes anthropogènes qui perturbent les équilibres de la biosphère sont caractérisés par des constantes de temps très courtes, sans commune mesure avec les phénomènes naturels ; d'où la possibilité de chocs brutaux, c'est à dire de perturbations devant lesquelles les réactions du milieu ne sont pas connus. Dans ce cas, on ne peut dire ou prédire avec certitude telle ou telle évolution de la composition chimique de l'atmosphère.

Il convient de compléter l'éventail des effets attendus sur la biosphère. Nous avons mentionné au début du chapitre l'effet de l'accroissement en CO₂ atmosphérique sur la croissance des espèces végétales : la taille des végétaux devrait augmenter avec l'augmentation de la concentra-

(1) Cette étroite corrélation va dans le sens d'une confirmation de la réalité de l'effet de serre ou d'un effet réciproque (la température influence l'équilibre du cycle du carbone).

(2) A. COMOLET, opus cité, p.11.

tion en CO₂ ainsi que la production végétale.

Il semble toutefois que les végétaux réagiront différemment aux variations de la température suivant la localisation géographique (1).

Selon l'écologiste G. WOODWELL (2), dans les latitudes moyennes et hautes, les températures plus élevées pourraient accroître de manière substantielle les taux de respiration des végétaux. Quand le processus de respiration dépasse le processus de la photosynthèse, la végétation rejette plus de CO₂ qu'elle n'en absorbe dans l'atmosphère. Toute élévation de la température entraîne alors un surplus significatif de CO₂ et renforce ainsi le réchauffement de la planète. Il envisage dès lors un arrêt de la croissance des arbres et finalement leur mort. A terme des forêts disparaîtraient et libéreraient des quantités importantes de carbone dans l'atmosphère. Il existe donc des incertitudes quant aux effets de l'accroissement de la teneur en CO₂ atmosphérique sur les écosystèmes terrestres. Pour les espèces végétales, tout va dépendre des processus de respiration et de photosynthèse qui s'opèrent au sein du cycle du carbone. On ne peut dire alors avec certitude si leurs réactions vont favoriser le réchauffement de la planète, ou bien au contraire le neutraliser partiellement.

Enfin, un autre effet majeur, résultant des rejets de SO₂ dans l'atmosphère concerne les pluies acides. Elles résultent de la transformation des oxydes de soufre et des oxydes d'azote présents dans l'atmosphère polluée respectivement en acide sulfurique et en acide nitrique. La responsabilité des émissions de SO₂ dans l'acidité des précipitations est cependant la plus importante : environ 70% de l'acidité est constituée par l'anion sulfurique, le reste étant constitué par l'anion nitrique (3). En raison de la présence d'acide sulfurique dans les précipitations, celles-ci ont vu leur PH baisser fortement. Alors que dans une atmosphère non polluée, le PH est toujours supérieur à 6, dans les années 1960 des mesures ont permis de constater une chute du PH sur l'ensemble de l'Europe moyenne et septentrionale : on a alors observé un PH inférieur à 5. Depuis, l'acidité des précipitations ne cesse d'augmenter.

Des records d'acidité ont été relevés dans les années 1970 dans de nombreux pays industrialisés ; les Etats-Unis par exemple avec une précipitation de PH 1,84 relevé en 1979 détiennent le record mondial d'acidité des pluies (4). Ainsi, cet apport d'acidité par les précipitations est-il lourd de conséquences écologiques à l'échelle de la biosphère.

(1) R.A. HOUGHTON, G.M. WOODWELL, opus cité, p.23.

(2) S. POSTEL, L. HEISE, "Reforestation the earth", *Scientific american*, avril 1989, p.18.

(3) F. RAMADE, *Les catastrophes écologiques*, Mc Graw-Hill, 1987, p.191.

(4) F. RAMADE, opus cité, p.193.

Un premier effet majeur est l'acidification des eaux continentales avec la baisse rapide du PH des lacs et des rivières. Depuis le milieu des années 1960, le PH des eaux lacustres en Europe et en Amérique du Nord ne cesse de baisser : au début des années 1970, plus de trente lacs de l'Est canadien présentaient un PH inférieur à 4,5, seuil au-delà duquel des perturbations écologiques affectent les communautés qui peuplent de telles causes. Un second effet réside ainsi dans les altérations des ressources vivantes aquatiques. La diminution du PH a pour corollaire une diminution de la diversité spécifique et de la productivité primaire du phytoplancton. Des espèces vivantes aquatiques diminuent en nombre du fait de la raréfaction de la nourriture disponible et de l'action toxique de cette acidification.

L'acidification provoque ainsi un appauvrissement des communautés lacustres ainsi qu'une chute importante de la productivité primaire et secondaire de tels écosystèmes. Ces effets sont résumés dans le tableau suivant.

Effets de l'acidification des eaux continentales sur les constituants majeurs des communautés aquatiques
(d'après divers auteurs)

pH	Décomposeurs	Végétaux macrophytes (algues filamenteuses)	Phytoplancton	Zooplancton	Mollusques	Insectes et autres invertébrés	Amphibiens
6,5		Multiplication de <i>Mougeons</i>		Accroissement de l'abondance de rotifères acidotolérants	Rarefaction de certaines espèces de bivalves et de pulmones		
6					Disparition de diverses espèces de bivalves et de gastéropodes		Difficulté de reproduction des salamandres
5,5		Accroissement de l'abondance d'algues filamenteuses	Rarefaction rapide des diatomées et chlorophycées	Rarefaction des <i>Daphnia</i> copepodes disparition de certaines espèces planctoniques		Arrêt de la reproduction de diverses espèces d'éphémères et d'écrevisses	
5	Accroissement de l'abondance de champignons aquatiques	Feutrage dû à la prolifération de cyanophycées et d'algue verte	Reduction de la biomasse et diversité du phytoplancton	Forte réduction de la productivité du zooplancton	Disparition de la plupart des mollusques bivalves et pulmones	Accroissement des insectes amphibiens larves Odonate. disparition des sangues	
4,5	Ralentissement du métabolisme des bactéries aérobies	Declin de certains hydrophytes (<i>Potamogeton</i>)	Disparition des diatomées			Disparition des éphémères et des perches	
4,2							Disparition des anoues
4		Ralentissement considérable de l'activité photosynthétique					
3,5	Ralentissement considérable de l'activité bactérienne				Disparition totale des mollusques	Disparition totale des écrevisses	Disparition totale des amphibiens

* Dans nom canadien du « wethive » *Stizostedion vitreum*

— *Lepomis gibbosus* (Centrarchidae)

Source : F. RAMADE, les catastrophes écologiques 1987, p.200

Enfin nous soulignerons un troisième effet notable de l'acidification de pluies. Il s'agit de la dégénérescence des forêts. Si à l'origine, seules les forêts situées à proximité ou au voisinage immédiat des points d'émission de SO₂ étaient affectées, depuis une quinzaine d'année, les forêts si-

tuées à l'écart des zones industrielles sont aussi concernées par des phénomènes de dégénérescence. Selon F. RAMADE, "l'extension des dommages apparus dans ces écosystèmes forestiers est parfaitement corrélée dans l'espace et dans le temps avec celle des précipitations acides" (1).

Les forêts européennes sont actuellement les plus touchées. L'exemple de l'Allemagne est révélateur de l'effet dévastateur de l'acidification des pluies : fin 1984, 51 % de la surface forestière de la RFA était atteinte de dégénérescence. Depuis le début des années 1980, le taux de dépérissement des forêts de conifères dans ce pays s'est considérablement accru. La dégradation des boisements concerne l'ensemble des pays d'Europe, à l'ouest comme à l'est, l'Amérique du Nord et aussi des pays de la zone tropicale tels la Chine ou le Brésil.

L'acidification des précipitations affecte aussi la productivité des forêts ; la croissance des arbres est ainsi ralentie.

Nous pouvons résumer dans un schéma (cf page suivante) les changements qui s'opèrent au sein de la biosphère dont l'origine essentielle réside dans les activités énergétiques. Il est important de noter cependant la fragilité des raisonnements qui tendent à informer ou confirmer certains effets que seul l'avenir pourra révéler comme justes ou faux. Nous pensons ici aux effets escomptés du réchauffement de l'atmosphère planétaire. Tandis que les effets de l'acidification des précipitations sont d'ores et déjà perceptibles et quantifiables, les conséquences que pourraient avoir l'effet de serre ne sont pas toutes évaluées avec certitude dans le long terme.

S'il est admis qu'un réchauffement est probable dans les décennies à venir, il existe de profondes divergences sur ses effets à l'échelle de la planète. Il existe peu de certitudes scientifiques et beaucoup d'incertitudes.

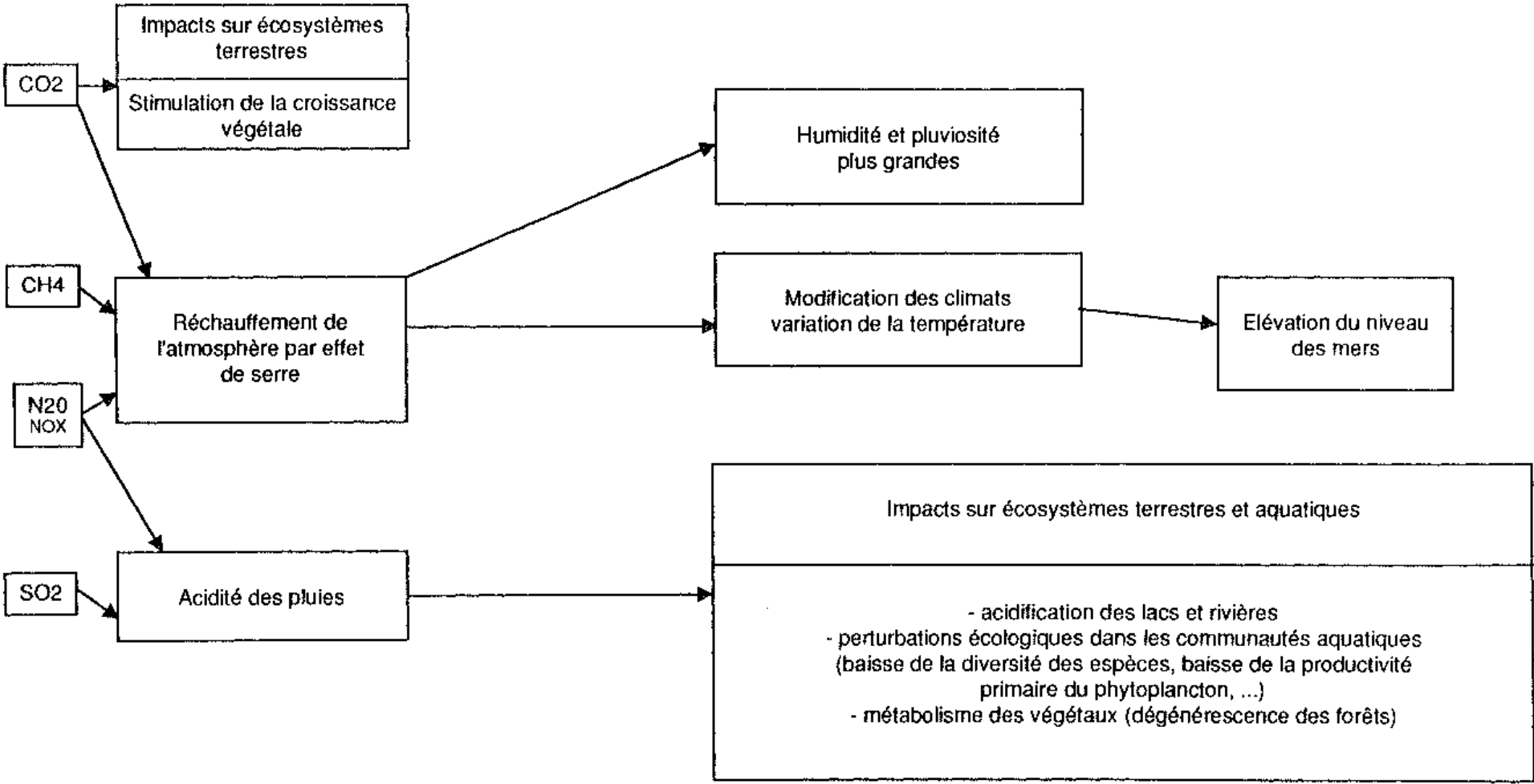
Nous savons que les concentrations atmosphériques de CO₂, CH₄, N₂O sont aujourd'hui plus fortes qu'elles ne l'ont jamais été lors du dernier cycle climatique. Ces gaz modifient l'équilibre radiatif de la terre. De plus, l'accroissement de leurs émissions est responsable d'une élévation de la température moyenne à hauteur de 0,5° C depuis la fin du 19^{ème} siècle.

Les équilibres de la biosphère, notamment climatique, résulte d'un ensemble complexe d'interactions physiques chimiques et biologiques. L'histoire nous a appris que dans le passé, notre planète a connu des perturbations majeures de température et de climat (2). La composition de l'atmosphère a elle aussi considérablement varié au cours du temps.

(1) F. RAMADE, opus cité, p. 202.

(2) F. RAMADE, *Ecologie des ressources naturelles*, Masson, 1981, p.120 et suivantes.

EFFETS DES COMPOSES CHIMIQUES
ISSUS DES ACTIVITES ENERGETIQUES



Ses variations ont pu contribuer significativement à l'amplitude des variations climatiques entre périodes glaciaire et interglaciaire. Ainsi, les changements récents auxquels nous sommes confrontés depuis un siècle font-ils partie d'une évolution de longue période ? Si la température s'élève, l'humidité plus grande aura certainement un effet dans les changements climatiques : comment apprécier le rôle des nuages dans la réflexion ou au contraire l'absence de réflexion de la lumière du soleil selon leur localisation en basse altitude ou en haute altitude ? Dans le premier cas, ils réduisent la tendance au réchauffement et dans le second ils l'aggravent (1). Difficile de prévoir quelle conséquence l'emportera.

I. RASOOL souligne d'autres incertitudes : rôle de l'océan dans le cycle du carbone, changements de température naturels et ceux issus des activités anthropogènes, incapacité des modèles à prévoir l'ampleur de l'effet de serre et ses effets régionaux, temporels.

Les prévisions diffèrent ainsi sur de nombreux points : changements de température selon les saisons et les régions, régime et intensité des pluies à l'échelle planétaire. Ainsi la difficulté majeure qui se pose aujourd'hui est la prévision des émissions futures et leurs effets à l'échelle planétaire. Le doute scientifique que l'on observe résultant de l'insuffisante connaissance des phénomènes qui s'opèrent au sein de la biosphère, rend les prévisions peu fiables. Une possibilité que nous ayons pour relever le défi que la nature nous lance aujourd'hui est de contrôler l'évolution à la fois du gaz carbonique, du méthane, des oxydes d'azote et des oxydes de soufre.

Il s'agit dès lors de réguler les émissions en intervenant au niveau de la composante technologique du système énergétique. Si l'on tient compte du caractère cumulatif de l'augmentation du CO₂, alors il convient d'agir efficacement dans un très court terme en mettant en oeuvre des techniques appropriées.

Puisqu'on ne connaît pas l'ampleur des émissions de ces gaz dans l'avenir - elles dépendent en effet du niveau des activités humaines -, ni leurs effets réels, - quels seront-ils ? quand se produiront-ils et dans quelle région de la planète ? -, il faut dès à présent agir et ne pas attendre de constater le réchauffement de la planète.

Nous allons dans le paragraphe suivant étudier les possibilités techniques dont la mise en oeuvre autorise la réduction, voire la suppression d'émissions des composés chimiques au sein du système énergétique.

(1) I. RASOOL, "L'environnement global, science et politique", *Economie et humanisme*, juillet-août 1989, p.45.

§ 4 - Les réponses technologiques

Face aux problèmes posés par l'effet de serre et l'acidification des précipitations et compte tenu du rôle majeur joué par la combustion des ressources énergétiques fossiles, une action efficace peut être menée au niveau des technologies de combustion desdites ressources. Le choix de procédés moins polluants ainsi que l'installation d'équipements permettant la réduction d'émissions lors de la combustion (NOX, SO₂) sont autant de possibilités réelles autorisant une meilleure efficacité énergétique et donc un accroissement des rendements non négligeables - au sein du processus de transformation et respectant l'environnement. Conjointement à une diminution des rejets, rejets qui traduisent le gaspillage de la ressource - ou la non optimalité de sa transformation - de telles améliorations technologiques permettront d'élever les rendements parfois très faibles selon la forme d'énergie produite. Pour indication, on a relevé quelques rendements des appareils de transformation d'énergie.

Forme d'énergie produite	Types d'appareil	Rendement %
Production de chaleur	chaudières à fioul	70-80
	chaudières au gaz naturel	75-85
	chaudières au charbon	60-70
Production d'électricité	centrale hydro-électrique	85-90
	centrale au fioul	40
	centrale au charbon	35
	centrale électro-nucléaire (1)	30

Source : d'après JM CHEVALIER et al., Economie de l'énergie, p. 126

(1) filière PWR : réacteurs à eau pressurisée.

Nous allons ainsi étudier de plus près quelques technologies qui non seulement permettent d'augmenter le rendement thermique (il y a donc économie de la ressource) mais encore impliquent une forte diminution des rejets dans l'atmosphère. La nature du combustible ainsi que sa qualité (basse teneur en soufre notamment) nous permettront de comparer selon la combinaison de technologies mise en oeuvre les niveaux d'efficacité dans l'élimination partielle des rejets d'oxydes d'azote, d'oxydes de soufre et de gaz carbonique.

Nous nous limiterons toutefois à l'étude des technologies de combustion qui génèrent deux types de vecteurs énergétiques : la chaleur et l'électricité. Les ressources fossiles sont largement sollicitées pour la satisfaction des besoins en chaleur et en lumière aussi bien dans l'industrie que dans le secteur domestique. Ainsi, à l'échelle mondiale, plus de 60 % de la production d'électricité est assurée par le charbon (pour 2/3) et les hydrocarbures (pour 1/3) (1).

Au sein du processus de combustion, des dispositifs techniques peuvent être placés en amont et en aval de la phase de combustion proprement dite. Il est clair que le choix du combustible ou de son traitement est un moyen important pour opérer une combustion avec rejets minimaux. Un charbon à basse teneur en soufre (< 1 %) libérera peu de SO₂ lors de sa combustion. De même, le choix de certains fuels lourds peut être décisif dans la réduction des oxydes de soufre émis (2).

L'utilisation du gaz naturel comme combustible d'appoint est un moyen satisfaisant de réduction des oxydes d'azote et de carbone (3) ; il est en effet "plus propre" que le charbon et le pétrole (absence de produits soufrés). Afin de réduire les effets inhérents à l'utilisation du combustible sur l'environnement, il est possible de le transformer préalablement.

La transformation du charbon en gaz ou procédé de gazéification va dans ce sens. Il existe plusieurs méthodes qui permettent d'obtenir ainsi un gaz combustible propre (4).

En amont de la combustion, des procédés de désulfuration et de dénitrification des fumées autorisent une réduction partielle des émissions de SO₂, NO_x. Les procédés de désulfuration humides avec chaux et calcaire donnent un taux d'extraction de 90 % du soufre. Le procédé par voie sèche, plus récent, ne permet qu'une élimination du soufre de l'ordre de 70 à 80 %.

La dénitrification des fumées fait l'objet de développement aux Etats-Unis, au Japon et en RFA (5). Cependant, les procédés de dénitrification des gaz de combustion demeurent en-

(1) A. SUISSA, "Le nouveau charbon", *Les Cahiers Français*, n°236, mai-juin 1988, notice 3.

(2) En France par exemple, les fuels lourds industriels (n°2) ne renferment plus de 2% de soufre. in F. RAMADE, *Les catastrophes écologiques*, Mc Graw-Hill, 1987, p.187.

(3) Le gaz naturel émet deux fois moins de CO₂ que le charbon, in P. RADANNE, "Vers un réchauffement global du climat", *Revue Systèmes solaires*, février 1989, p.79.

(4) Conférence mondiale de l'énergie, *Energie, besoins, espoirs*, synthèse des travaux, 1986, p.171.

(5) Conférence mondiale de l'énergie, opus cité, p.107-108.

core au stade de procédés pilotes dans ces pays. Les oxydes d'azote sont supprimés par réduction catalytique. D'autres procédés font l'objet d'expérimentation (1).

L'ensemble de ces mesures peuvent donc réduire les émissions de SO₂ et NO_x. Il est encore difficile de réduire les émissions de CO₂ qui ne peuvent être éliminés à la sortie des installations. Ainsi, lors de la conférence mondiale de l'énergie en 1986, s'est-on interrogé sur la nécessité future d'une décarbonisation des gaz de fumées. Un membre du groupe de recherche énergétique de Cambridge, R.J. EDEN, a ainsi conclu à la nécessité de renforcer les politiques en matière de reboisement pour résoudre ce problème (2).

Envisager des modifications au niveau des technologies de combustion semble plus satisfaisant de ce point de vue et permet efficacement d'agir à la fois sur les rejets de CO₂, NO_x et SO₂ et sur le rendement énergétique. Les développements récents de nouvelles technologies induisent une rupture radicale avec les technologies de combustion classiques qui n'intégraient pas la contrainte environnementale. Nous nous référons ici à l'utilisation de combustible (charbon, gaz) dans les chaudières pour la production d'électricité.

La technologie de la combustion en lit fluidisé constitue un progrès majeur car elle permet de contrôler les émissions de SO₂ sans avoir recours à des systèmes de désulfuration. La combustion en lit fluidisé atmosphérique permet de capturer 90 % du soufre contenu dans le charbon. Cette technologie de plus induit de faibles émissions de NO_x. Cela résulte d'une température plus basse que dans la technique largement répandue de la pulvérisation préalable du charbon avant sa combustion dans la chaudière. Au lieu de 1 400° C nécessaire avec celle-ci, la technique du lit fluidisé s'opère à 850° C. On distingue trois types d'unités de combustion en lit fluidisé : les systèmes à lit fluidisé atmosphérique bouillonnant et circulant et le système à lit fluidisé pressurisé (figure1).

(1) AIE, *Technologie du charbon propre, programmes et perspectives*, 1987, p.17.

(2) Conférence mondiale de l'énergie, opus cité, 1986, p.239.

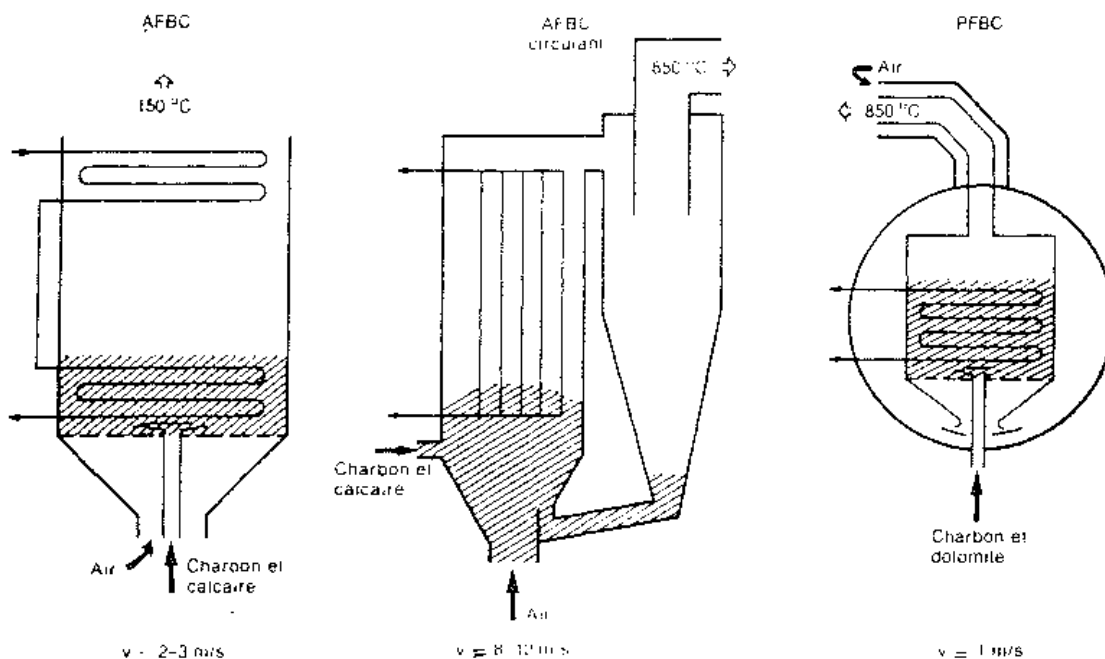


Figure 1. Différentes variantes de combustion en lit fluidisé

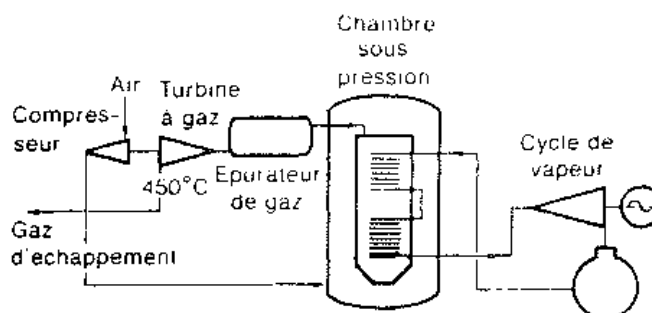


Figure 2: Système de combustion en lit fluidisé sous pression.

Source : Conférence mondiale de l'énergie, 1986, op.cité, p.170, 242

Les caractéristiques des systèmes à lit fluidisé pressurisé sont excellentes du point de vue de l'environnement (figure2). Comme dans les systèmes à lit fluidisé atmosphérique, le soufre contenu dans le charbon est piégé par réaction avec la dolomite ou le calcaire au sein du lit fluidisé. Par rapport aux niveaux d'émissions des chaudières actuelles à charbon pulvérisé, les émissions d'oxydes de soufre sont réduites de 90 à 95 %, celles d'oxydes d'azote de 60 à 75 % (1).

De plus, un autre facteur favorable au développement des techniques de combustion en lit fluidisé doit être souligné. Le combustible en alimentation de la chaudière peut être de qualité médiocre, la combustion en lit fluidisé sous pression et la combustion en lit fluidisé

(1) Conférence mondiale de l'énergie, 1986, p.241.

atmosphérique s'effectuera parfaitement.

Ainsi, l'Espagne a adopté cette technologie de combustion qui répond tout à fait à la mauvaise qualité des charbons extraits localement (1). En évitant le lavage des charbons contenant jusqu'à 8 % de soufre, des charbons de mauvaise qualité sont employés massivement ; le charbon alimente les centrales électriques à hauteur de 65 % dans ce pays. Une centrale de démonstration de production d'électricité avec lit fluidisé sous pression, d'une capacité de 65 MWe est envisagée (figure 2).

D'autres pays poursuivent des efforts de RD et D afin de rendre l'utilisation du charbon plus propre (2). La technologie de la combustion en lit fluidisé est largement étudiée par des pays tels la Suède, le Royaume-Uni, l'Allemagne ou encore les Etats-Unis. L'ensemble de ces pays ont ainsi développé des pilotes de production depuis quelques années.

En Suède, un système original de combustion en lit fluidisé pressurisé a été développé et l'unité pilote fournit de bons résultats (3). Afin d'optimiser la technologie de la combustion en lit fluidisé, celle-ci a été intégrée au sein d'un cycle combiné, c'est à dire qu'il comprend une turbine à vapeur et une turbine à gaz pour la production d'électricité (figure 3).

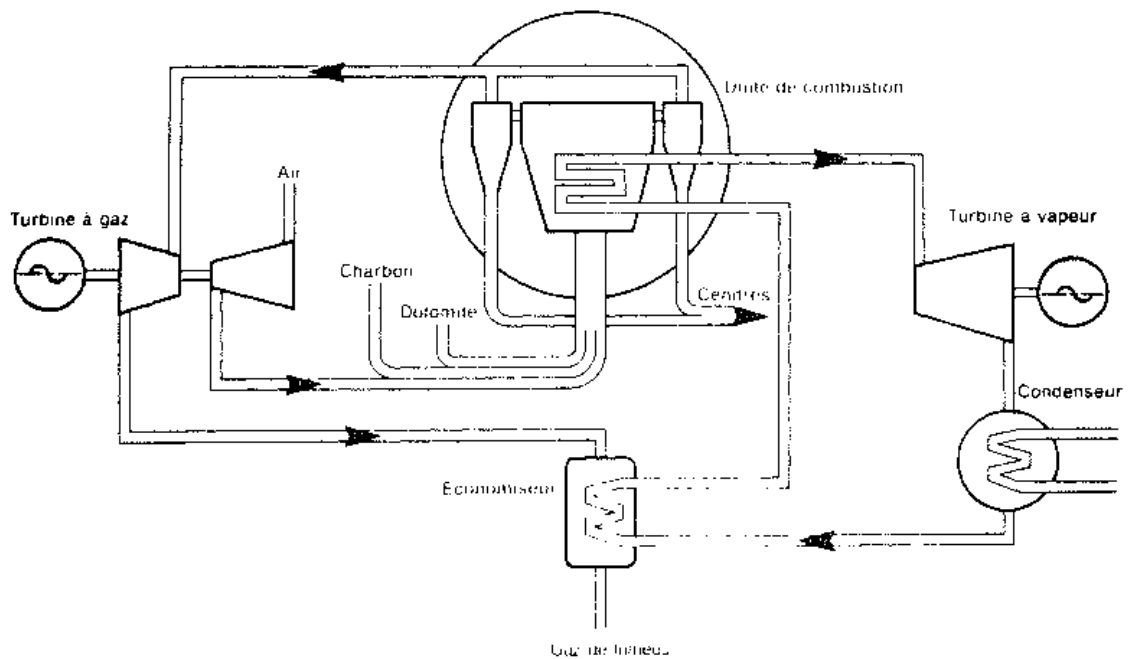


Figure 3: Schéma du système PFBC de combustion en lit fluidisé (ASEA).

(1) Conférence mondiale de l'énergie, opus cité p.243.

(2) AIE, opus cité, p.24-25.

(3) Conférence mondiale de l'énergie, opus cité, p.241. C'est le groupe ASEA qui a développé cette technologie particulière.

Le cycle combiné implique un rendement pour la production d'électricité de 10 à 15 % supérieur à celui des centrales classiques. Pour produire une même quantité d'électricité, il faut donc 10 à 15 % de combustibles en moins. La technologie de la combustion en lit fluidisé pressurisé permet un gain supplémentaire de 25 %. La production d'électricité en cycle combiné permet dans ce cas d'améliorer le rendement de la conversion énergétique de l'ordre de 40 %. Le projet suédois prévoit la construction d'une centrale de chauffage urbain de 135 /210 MWe.

Aux Etats-Unis, c'est une ancienne centrale qui va être remise en service et sera équipé d'un module turbine à gaz unité de combustion du type ASEA - PFBC. Le charbon d'alimentation sera à forte teneur en soufre (4 %). La capacité prévue de l'unité est de 70 MWe.

La technologie du cycle combiné permet ainsi une amélioration notable du rendement au niveau de la centrale équipée d'une technologie à combustion en lit fluidisé pressurisé. L'élément clé du cycle combiné mérite d'être précisé. Il s'agit de la turbine à gaz. En effet, le rendement global du cycle combiné dépend de la température à l'entrée de la turbine à gaz : plus elle est élevée et plus grand est le rendement. Des recherches portant sur des turbines à gaz à haute température d'admission sont en cours. De telles turbines, assurant un rendement meilleur, devraient permettre une meilleure conservation du combustible et conjointement des niveaux d'émissions plus faibles avec un meilleur contrôle de la combustion ; et donc, une réduction substantielle des pollutions (1) (NOX, SO₂, CO₂).

La plus grande centrale à cycle combiné du monde est située en Allemagne sur le site de Gersteinwerk de VEW. Sa capacité est d'environ 750 MW. Elle fonctionne avec du charbon et du gaz naturel : le charbon est brûlé dans la chaudière et le gaz naturel est brûlé dans la turbine à gaz de la centrale. Elle dispose d'une turbine à gaz à haute température d'admission (930° C). Le rendement de la centrale est supérieur à celui des centrales chauffées au charbon à cycle combiné (2). Cela se traduit par une économie de plus de 10 % du combustible. Ce meilleur rendement résulte de l'utilisation de gaz naturel en complément du charbon.

(1) W.K.F. KELLER, "The gas and steam combined cycle", Conférence mondiale de l'énergie, *L'énergie demain*, 1989, p.12-13.

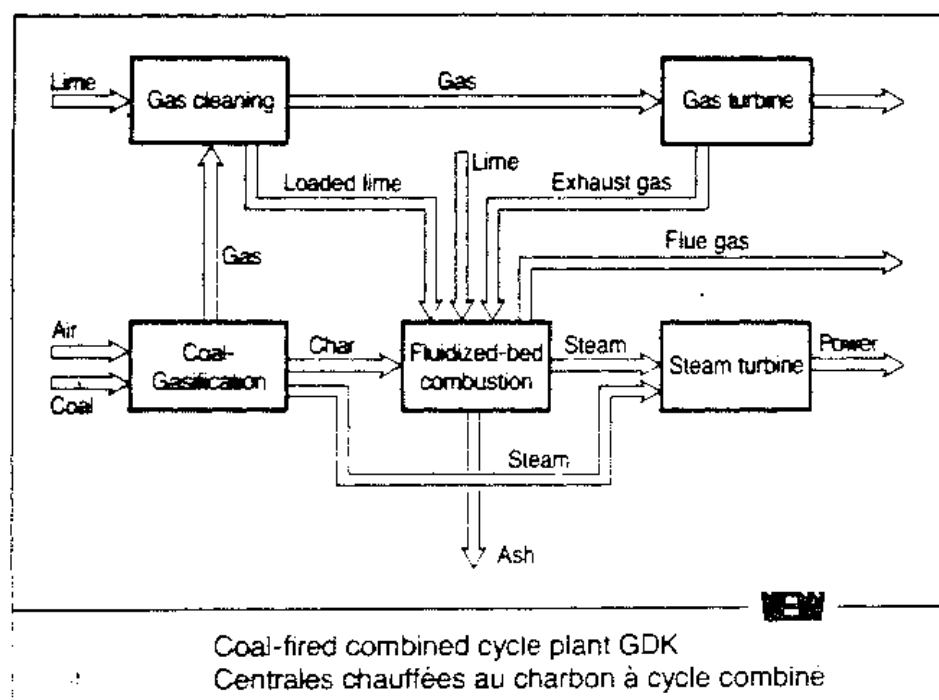
(2) K. KNIZIA, M. SIMON, "Coal-fired combined-cycle plants and high-temperature reactors for energy supply of tomorrow", Conférence mondiale de l'énergie, *L'énergie demain*, 1989, p.4-5.

C'est le principe de l'emploi sélectif du gaz naturel : le gaz naturel est brûlé avec des combustibles plus polluants (charbon ou pétrole) dans une même installation de combustion ou dans deux installations séparées. Il en résulte un contrôle efficace des rejets émis, leur réduction, et l'accroissement du rendement de l'installation (1).

Cependant, afin d'exploiter le cycle combiné exclusivement avec du charbon, un processus combinant une gazéification partielle du charbon et le cycle combiné gaz-vapeur a été mis au point au sein de la centrale.

A travers cet exemple, nous présentons une autre technologie permettant de réduire les émissions avant et pendant la combustion du charbon. Notons toutefois que des charbons de qualité relativement bonne sont nécessaires si l'on souhaite obtenir un fonctionnement optimal du cycle combiné à gazéification intégrée.

Le processus est actuellement développé à l'aide d'une unité prototype sur la base de la configuration suivante.



Source : K. KNIZIA, M. SIMON, op.cité, p.7

(1) J. KEAN, "Select use of gas : a key to enviromental quality control", Conférence mondiale de l'énergie, *Energie, besoins, espoirs*, 1986, p.3-6.

Le procédé intègre une combustion en lit fluidisé. Le cycle combiné avec gazéification du charbon permet selon ce procédé une forte réduction des émissions de CO₂. Compte tenu des pertes résultant de la conversion du charbon en gaz combustible, le rendement du cycle combiné à gazéification du charbon demeure sensiblement inférieur à celui du cycle combiné brûlant charbon et gaz naturel ; et cela quelque soit la température d'admission de la turbine à gaz (900 à 1.200° C) (1). Cette technologie est cependant susceptible d'être améliorée et d'autoriser des rendements plus élevés. L'application du système de transfert de chaleur peut ainsi élever la puissance de la turbine à gaz (2). Le rendement du cycle combiné avec gazéification intégrée atteint alors près de 50 % (au lieu de 40 - 45 %).

Généralement, quelque soit le procédé, le cycle combiné avec gazéification du charbon permet une forte réduction des émissions de SO₂ et NO_x : 99,5 % voire même plus - du soufre contenu dans le charbon peut être enlevé (3). Dans les années à venir, un contrôle meilleur de ces émissions est attendu du fait des améliorations techniques relatives notamment à l'augmentation du rendement des turbines à gaz et à la technologie de la gazéification. Ainsi, le procédé SHELL de gazéification du charbon associé à un cycle combiné dont le rendement est de 43 % -contre 39 % pour la technique classique de combustion du charbon pulvérisé- permet une réduction de 10 % des émissions de CO₂ par Kw produit aujourd'hui et devrait autoriser une réduction de 20 % de celles-ci d'ici l'an 2000.

Dans l'ensemble des procédés de gazéification développés jusqu'ici et associés à un cycle combiné, on observe pour une même quantité d'énergie produite une plus faible consommation de combustibles et une réduction importante de SO₂ (4).

Aux côtés de la technologie de la combustion en lit fluidisé et de celle que nous venons de présenter, il existe d'autres moyens techniques de lutte efficace contre les émissions polluantes.

(1) K. KNIZIA, M.SIMON, opus cité, p.8-9.

(2) Il s'agit de chauffer l'air comprimé de la turbine à gaz dans le générateur de vapeur. La puissance de la turbine à gaz augmente sans que la puissance de l'unité de gazéification n'est été augmentée par ailleurs.

(3) S.M.C. PILLAI, "Future trends on use of fossil fuel and combined cycle for power generation", Conférence mondiale de l'énergie, L'énergie demain, 1989, p.10-12.

(4) T. HOPE et al., "Integrated gasification combined cycle power generation using an advanced coal gasification process", Conférence mondiale de l'énergie, L'énergie demain, 1989, p.6.

Notons parmi eux le rôle joué par les brûleurs dans la diminution des NOX ainsi que du SO2. Ainsi, au sein d'une installation pilote les résultats obtenus ont été très satisfaisants : 70 à 80 % du SO2 est contrôlé et les niveaux d'émission de NOX demeurent en deçà de 100 ppm lors de la combustion du charbon (1).

Les développements de la technologie du brûleur LNS sont prometteurs ; les Etats-Unis et le Canada poursuivent dans ce domaine d'importantes recherches.

La mise au point future d'un brûleur LNS pressurisé et son intégration dans un cycle combiné gaz-vapeur pourrait assurer un haut rendement du cycle thermodynamique, en économisant ainsi les émissions de CO2.

Les technologies présentées ici sont susceptibles de nombreux développements. La combustion en lit fluidisé et la gazéification du charbon peuvent être intégrées dans des processus de production combinée d'électricité et de chaleur. Cette coproduction de chaleur et d'électricité est appelée encore cogénération ou couplage force-chaleur.

Les systèmes de cogénération produisent à partir d'une énergie primaire à la fois de l'énergie électrique ou mécanique et de l'énergie thermique. La cogénération permet de capturer l'énergie thermique gaspillée issue d'une chaudière - chaudière destinée à la production d'électricité- et de l'utiliser pour des applications thermiques dans l'industrie et l'habitat (2). La cogénération s'applique parfaitement aux réseaux de chaleur. La vapeur produite au niveau de la chaudière pendant la combustion du charbon peut produire dans un premier temps de l'électricité puis être destinée au chauffage des logements. Le Danemark a acquis dans ce domaine une grande expérience. En 1987, 27 % des besoins en chauffage domestique sont satisfaits par les centrales chaleur-électricité. En l'an 2000, on estime que l'offre de chaleur issue de la production combinée chaleur-électricité va satisfaire les besoins en chauffage à hauteur de 37 % (3). Des systèmes de cogénération se développent dans d'autres pays : en Europe (surtout en Allemagne) et aux Etats-Unis principalement (4).

(1) W.L. FRASER, "Low-cost environmental control technologies for coal utilization", Conférence mondiale de l'énergie, *L'énergie demain*, 1989, p.5-7.

(2) J. HUBLER, M. KISS, "Decentralized medium size cogeneration plants", Conférence mondiale de l'énergie, *L'énergie demain*, 1989, p.2-3.

(3) J.E. KNUDSEN, J.H. RICKEN, "Development of Danish combined heat and power systems", Conférence mondiale de l'énergie, *L'énergie demain*, 1989, p.6.

(4) A. BONDUELLE, "Cogénération : pour un couple moderne", *Reporterre*, octobre 1989, p.24-25. Voir aussi : "Chaleur-force, le couple de l'année", *Systèmes Solaires*, Janv. 89, p.53-57.

Le principe à la base de la cogénération est le rendement énergétique exprimé par le ratio suivant :

$$R = \frac{\text{énergie produite ou utilisée}}{\text{énergie totale consommée}}$$

Généralement, le rendement énergétique d'une centrale électrique (thermique classique ou nucléaire) est de l'ordre de 40 % ; 40 % de la chaleur des chaudières est converti en électricité, les 60 % restants sont dissipés dans l'environnement.

La production combinée de chaleur et d'électricité permet d'élever considérablement ce rendement. Selon P.RADANNE et L. PUISEUX, la production en cogénération a un rendement de 90 %, 60 % de chaleur et 30 % d'électricité.

Départ	Rendement	Résultat
Production simple de chaleur: 10 tep	90 % 10 %	9 tep de vapeur utile 1 tep de perte dans les fumées
Centrale électrique : 10 tep	39 % 61 %	3,9 tep d'électricité 6,1 tep de perte dans les fumées et dans la chaleur non utilisée à la sortie de l'alternateur
Cogénération : 10 tep	60 % 90 % 30 % 10 %	6 tep de vapeur utile 3 tep d'électricité finale 1 tep de perte dans les fumées

Source : P. RADANNE, L. PUISEUX, L'énergie dans l'économie, p.158, 1989.

Cet accroissement du rendement énergétique a pour corollaire une diminution considérable des émissions de CO₂ ainsi que de SO₂ et NO_x.

La cogénération joue à deux niveaux dans le contrôle des émissions polluantes : pour une même production d'électricité, elle autorise une consommation plus faible de combustibles (1) tout en assurant le doublement du rendement de l'installation et donc une efficacité énergétique plus grande que dans les centrales classiques. A coproduire chaleur et électricité au sein d'une centrale électrique, l'augmentation de l'efficacité énergétique et la diminution de la consommation de combustibles contribuent à une meilleure régulation des rejets de CO₂, NOX et SO₂. Par ailleurs, les progrès relatifs à combustion en lit fluidisé sous pression, cycle combiné, gazéification du charbon ou à l'emploi sélectif du gaz naturel sont autant de réponses technologiques susceptibles d'améliorer la cogénération.

Une étude comparative originale réalisée lors de la conférence mondiale de l'énergie à Montréal en 1989 apporte un éclairage sur l'efficacité des différentes technologies en matière d'environnement (2).

Quatre types de centrale électrique sont étudiées du point de vue de leur rendement et de leurs émissions de SO₂, NOX et CO₂ :

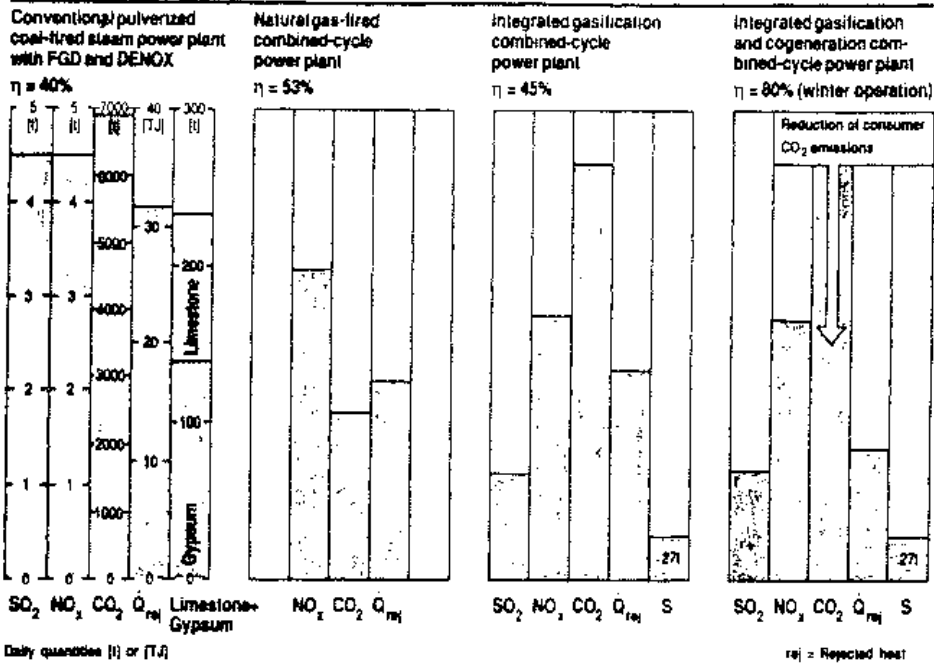
- une centrale thermique classique avec la combustion du charbon pulvérisé
- une centrale électrique équipée d'un cycle combiné brûlant du gaz naturel
- une centrale équipée d'un cycle combiné à gazéification du charbon intégrée
- une centrale équipée d'un cycle combiné à gazéification intégrée avec cogénération

La figure ci-dessous illustre les rendements des différentes installations et les niveaux d'émissions.

(1) Selon P. RADANNE et L. PUISEUX, la cogénération nécessite deux fois moins de combustibles fossiles (fuel ou charbon) que dans les centrales thermiques classiques. Opus cité, p.159.

(2) W.K.F. KELLER, opus cité, p.15-17.

SIEMENS



Efficiencies, Emissions and Additives for Conventional and Advanced Power Plants (300 MWe, heat output implicit)

Rendements, émissions et additifs pour des centrales traditionnelles et avancées (300 MW sans production de chaleur)

US 1110 Ch
US 361
US 1110 Ch

Source : W.K.F. KELLER, opus cité

Chaque centrale produit 300 Mwe. Les rendements des centrales électriques avancées sont basés sur des températures d'admission élevées de la turbine à gaz ; ce type de turbine devrait être opérationnel dans les années à venir. Concernant la cogénération, le rendement est estimé à 80 % ; 40 % d'output électrique et 40 % d'output thermique.

Il apparaît clairement que les systèmes conventionnels de combustion du charbon pulvérisé nécessitent afin de réduire les émissions de SO₂ de grandes quantités de gypse et de calcaire. Cependant, ils émettent encore des quantités importantes de SO₂ ; bien supérieures à celles émises par les centrales avancées. Notons que la centrale électrique brûlant du gaz naturel n'émet pas de SO₂.

Les émissions de NO_x sont fortement réduites avec les centrales avancées. Pour les rejets de CO₂, leur ampleur dépend du combustible retenu : avec le gaz naturel, les émissions de CO₂ sont faibles car ce combustible contient peu de carbone. Il existe un potentiel important pour une réduction significative des émissions de CO₂ à travers la variante cogénération.

La cogénération permet l'obtention de faibles niveaux de rejets avec un rendement énergétique très élevé. Les conclusions de l'étude sont que d'une part, les cycles combinés

présentent de grands avantages compte tenu des émissions et contribuent à réduire l'impact négatif de la combustion des ressources fossiles, d'autre part, le potentiel d'accroissement du rendement n'a pas encore été épuisé (possibilité d'aller plus loin dans l'économie de la ressource grâce à des améliorations technologiques - température d'admissions de la turbine à gaz - et à des combinaisons de production originales - la cogénération).

Les problèmes inhérents à la combustion des ressources fossiles peuvent donc être minimisés grâce à l'utilisation de technologies assurant une transformation à haut rendement de ces ressources.

Déjà employées dans quelques pays industrialisés, ces technologies contribuent à la maîtrise des émissions de SO₂, NO_x, CO₂ sans cependant parvenir à les réduire totalement. C'est pourquoi il est nécessaire de redonner une plus grande place aux ressources non fossiles tout en poursuivant les améliorations nécessaires technologiques relatives à la combustion des ressources fossiles.

La prise en compte de la relation énergie-biosphère pour comprendre comment les éléments agissent et rétroagissent les uns sur les autres et pour identifier les degrés de liberté dans le champ d'action est fondamentale du point de vue du système énergétique. Le vecteur technologique tel que nous l'avons présenté associé aux ressources fossiles imprime au système énergétique une plus grande souplesse et une meilleure adéquation aux équilibres de la biosphère.

Cependant, nous allons voir que les besoins des populations futures ne pourront être satisfaits par la seule utilisation des ressources non renouvelables malgré les progrès technologiques accomplis et à venir dans le domaine de l'extraction ou de la transformation (1). Considérant que les possibilités techniques assurant une meilleure transformation des ressources fossiles ne constituent qu'un élément de réponse face aux déséquilibres de la biosphère, dans la perspective des besoins énergétiques futurs nous serons amenés à prendre en compte le vecteur technologique dual ; celui associé aux ressources renouvelables.

La confrontation des ressources disponibles et des usages avec la nécessité de limiter le rôle perturbateur du système énergétique sur les équilibres de la biosphère va alors dessiner les contours, les frontières d'un nouvel espace de satisfaction énergétique. C'est précisément l'objet de la section qui va suivre.

(1) P-H POURRELIER, R. DIETRICH, *Le mobile et la planète ou l'enjeu des ressources naturelles*, Economica, 1989. Pour une synthèse des progrès relatifs à la chaîne du charbon, se reporter aux pages 265-266.

Section 2 - Les besoins énergétiques et la contrainte environnementale

§ 1 - Croissance économique et croissance de la consommation énergétique : un découplage durable ?

L'analyse des évolutions dans le temps de la consommation d'énergie et de la croissance économique fait apparaître un bouleversement radical depuis le premier choc pétrolier en 1973. Alors que pendant de nombreuses années, ces deux facteurs étaient étroitement corrélés, depuis une quinzaine d'années, on assiste à un découplage entre croissance économique et croissance de la consommation énergétique. L'élasticité énergétique qui est l'expression du rapport entre taux de croissance de la consommation d'énergie et taux de croissance du PIB, a ainsi augmenté de 0,83 sur la période 1950-59 à 0,90 sur 1959-1968, puis à 1,15 sur 1966-1973 pour chuter à 0,11 sur la période 1973-1982. (1)

Un autre indicateur d'une telle évolution est l'intensité énergétique (rapport entre consommation d'énergie finale et produit intérieur brut). De 1950 à 1973, on a pu observer une corrélation presque parfaite entre PIB et consommation d'énergie dans chaque pays industrialisé. Mais dès 1973, l'intensité énergétique chute sous l'effet d'une forte diminution de la consommation énergétique. Des besoins énergétiques limités et une croissance économe en ressources énergétiques traduisent la rupture d'une relation considérée jusqu'ici comme irrefutable.

(1) D. MAILLARD, "L'élasticité énergie PIB, sophisme ou panacée", *Economies et sociétés*, EN, n°1, 1983, p.1839-1840.

Evolution de l'intensité énergétique - cas de pays industrialisés

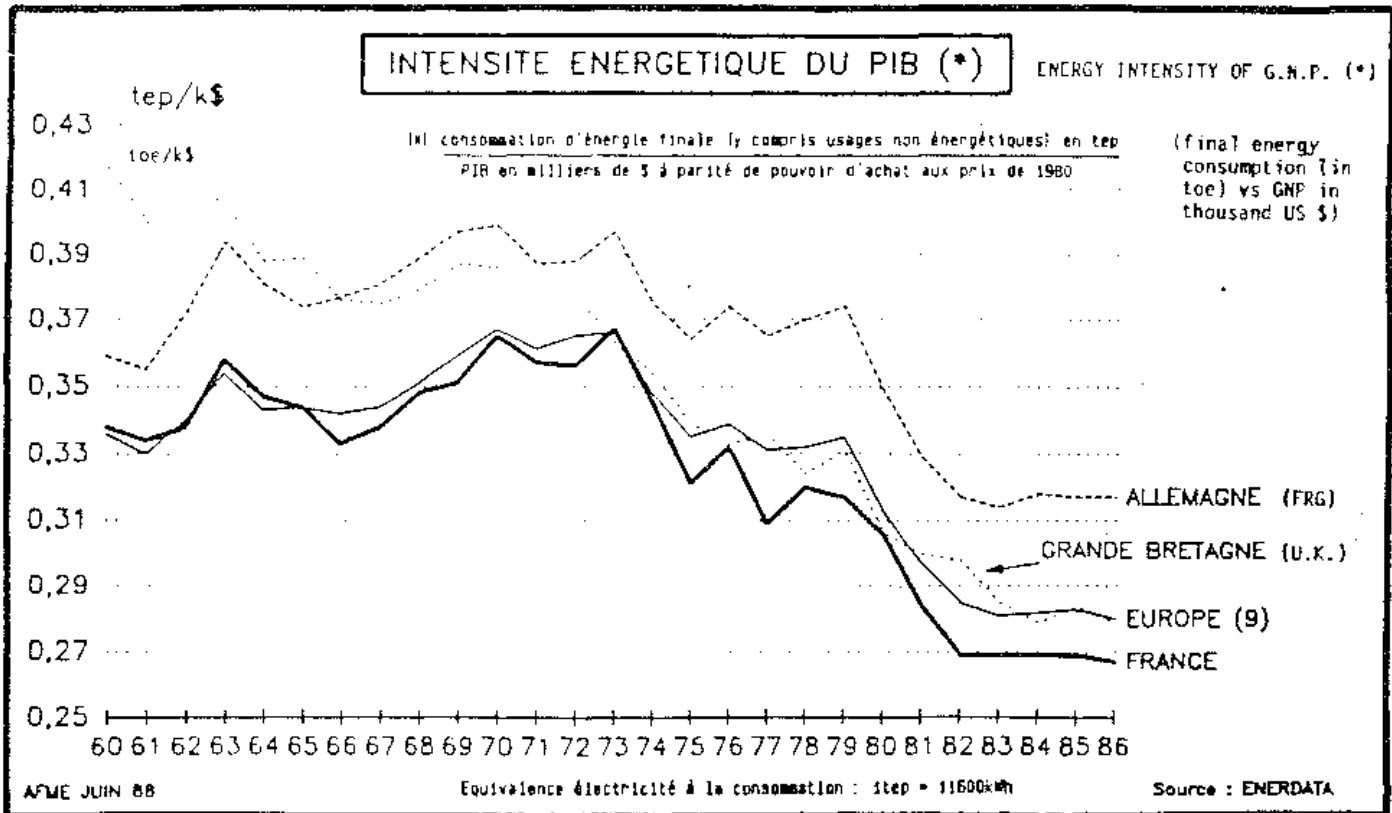
	1973	1984
ETATS UNIS	100	76,8
JAPON	100	65,4
ALLEMAGNE FEDERALE	100	79,3
ROYAUME-UNI	100	78,0
FRANCE	100	75,6

Source : CME, 1986, synthèse des travaux, page 47

Cette évolution traduit une modification dans la structure des consommations : les activités productives exigent moins d'énergie pour générer une même valeur ajoutée. Elle exprime aussi la diminution de la consommation unitaire d'énergie pour un usage donné : au Japon, par exemple, la consommation unitaire par tonne d'acier a diminué de 21 % entre 1973 et 1984 (1). Les besoins d'énergie spécifiques diminuent grâce à l'acquisition de nouveaux procédés, l'amélioration des rendements d'utilisation des équipements énergétiques (isolation, régulation, récupération, production combinée).

La figure suivante illustre la décroissance de la consommation d'énergie par unité de PIB observée dans différents pays depuis le premier choc pétrolier. Cette décroissance a été très forte entre 1973 et 1984 pour l'ensemble des pays de l'OCDE : de l'ordre de 18 %.

(1) Conférence mondiale de l'énergie, Synthèse des travaux, Cannes 1986, p.51.

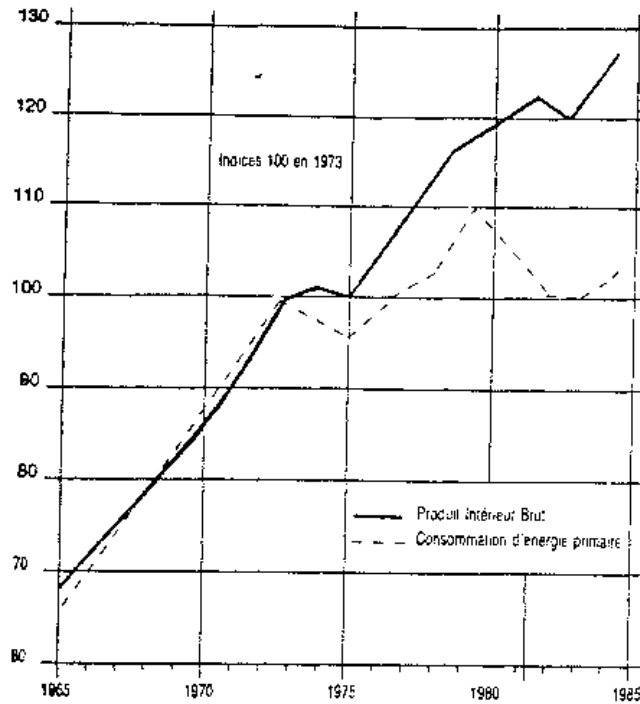


Source : P. CHARTIER, F. MOISAN, "Progrès technologique et amélioration des consommations spécifiques", Conférence mondiale de l'énergie, Montréal 1989, L'énergie demain.

Une étude comparative de l'évolution de l'intensité énergétique de l'activité économique sur une longue période pourrait révéler qu'une telle évolution est spécifique à un pays particulier (absence de périodisation identique). Des différences de nature structurelle entre les pays industrialisés se traduisent par des phases de croissance et de décroissance de l'intensité énergétique du PIB à très long terme.(1)

Le graphique suivant encore traduit parfaitement la dissociation : croissance de la consommation d'énergie - croissance économique.

(1) J-M MARTIN, "L'intensité énergétique de l'activité économique dans les pays industrialisés : les évolutions de très longue période livrent-elles des enseignements utiles ?", *Economies et sociétés*, EN, n°4, 1988, p. 9-27.



Produit intérieur brut et consommation d'énergie des pays de l'OCDE (indices)

Source : Conférence mondiale de l'énergie, synthèse des travaux, énergie, besoins, espoirs, Cannes 1986, page 70.

Entre 1973 et 1987, la croissance du produit intérieur brut par habitant en FRANCE a été de 29 %. Sur la même période, la croissance de la consommation d'énergie par habitant n'est que de 2 %. Une évolution semblable s'opère dans l'ensemble de la CEE : depuis 1973, la croissance du PIB est de l'ordre de 24 % tandis que celle de la consommation énergétique n'est que de 3 % (1). Dans les pays développés, le découplage observé entre 1973 et 1986 a conduit à une baisse de 2 % des besoins d'énergie primaire pour une croissance économique de 18 % (2).

Le découplage entre l'évolution du produit intérieur brut et la demande d'énergie observé depuis 15 ans peut être expliqué par la prise en compte de changements survenus dans les pays industrialisés. Trois éléments majeurs sont ainsi à l'origine de la rupture : les économies d'énergie, les changements dans la structure de l'industrie et les modifications des productions de l'industrie.

(1) P. RADANNE, L. PUISEUX, *L'énergie dans l'économie*, Syros, 1989, p.119-121.

(2) J-C HOURCADE, G. MEGIE, J. THEYS, "Politiques énergétiques et risques climatiques, comment gérer l'incertitude ?" , *Futuribles*, septembre 1989, p.42.

Les économies d'énergie interviennent dans l'ensemble des secteurs de l'économie : l'habitat, les transports, l'agriculture et l'industrie. L'amélioration de l'efficacité énergétique induit une diminution des consommations énergétiques au sein des procédés. Dans l'industrie automobile, elle résulte d'améliorations notables dans la conception même du produit et de l'introduction de nouveaux matériaux. Les quantités d'énergie nécessaires à la fabrication des produits sont fortement diminuées : il fallait 0,66 tonnes d'acier en 1950 pour la construction d'un véhicule PEUGEOT 203, en 1995, il suffira de 0,33 tonnes d'acier pour la construction de la PEUGEOT "ECO 2000".(1)

Dans l'industrie lourde, la sidérurgie principalement des techniques de récupération des condensats, le calorifugeage ou encore les récupérations de chaleur et une meilleure régulation des systèmes impliquent aussi des réductions de consommation de pétrole ou de charbon. Non seulement les améliorations de procédés existants mais la substitution de nouveaux procédés plus performants sont à l'origine d'une diminution des intrants énergétiques (2). Ainsi depuis 1973, la consommation d'énergie par l'industrie en France est passée de 58 Mtep à 46 Mtep en 1987. Pour une diminution de 20 % de la consommation énergétique, la production industrielle a augmenté de 11,4 % sur la même période (3).

L'exemple de la consommation de pétrole dans l'industrie française est révélateur : de 1973 à 1986, elle est passée de 24 Mtep à 9,6 Mtep ; soit une baisse de 60 %. Il faut cependant noter ici que cette diminution incombe principalement à la substitution du charbon et du gaz naturel au pétrole et non à des améliorations de procédés utilisant du fuel lourd (4).

On a observé ainsi depuis 1973 une baisse de l'intensité énergétique de l'industrie française. De 0,366 en 1973, elle passe à 0,254 en 1985. Le graphique suivant explique cette évolution à travers les consommations spécifiques d'énergie de l'industrie. (5)

(1) B. DESSUS, *Incertitudes et promesses technologiques à long terme dans le domaine énergétique*, 1989, p.7. ECCO 2000 est un prototype. Sa consommation spécifique est de 3,5 litres. La Peugeot 203 consommait 8,2 litres.

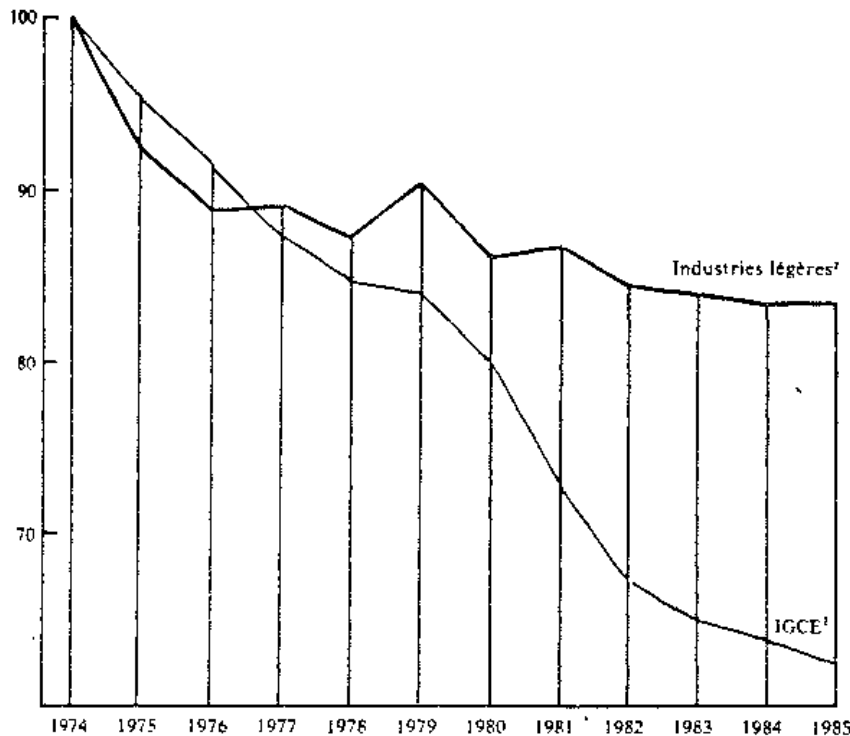
(2) Pour un examen de la consommation d'énergie dans les procédés industriels, se référer à : Conférence mondiale de l'énergie, Synthèse des travaux, *Energie, besoins, espoirs*, 1986, p.349-

(3) P. RADANNE, L. PUISEUX, *L'énergie dans l'économie*, Syros, 1989, p. 89.

(4) opus cité, p.89.

(5) La consommation d'énergie spécifique est la quantité d'énergie qu'il est nécessaire de consommer pour la fabrication d'une unité de produit.

Évolution des consommations spécifiques d'énergie de l'industrie
hors BTP¹ par grand secteur
(Base 100 en 1974) (France)



Source : AFME.

1. Ratio utilisé : consommation en tep par unité de valeur ajoutée exprimée au prix de 1970.

2. IGCE : industries grosses consommatrices (sidérurgie, chimie, ciment, métallurgie des non-ferreux, verre, papier, carton), industries légères : industries agro-alimentaires, industries de biens d'équipement, textiles, industries diverses.

Source : P-H BOURRELIER, R. DIETRICH, *Le mobile et la planète*, page 61.

Tandis que sur la période 1974-1985 l'activité économique augmente de 30 %, une forte décroissance de la consommation énergétique est observée. Le cas de la France n'est pas isolé et cette évolution concerne la plupart des pays industrialisés (1). L'examen des consommations spécifiques des différentes branches confirme une baisse tendancielle générale, baisse qui dans la plupart des cas est antérieure au premier choc pétrolier.

Ainsi, bien plus qu'une adaptation des facteurs de production à des coûts élevés de l'énergie, la décroissance semble être plus expliquée par l'effet de structure en partie, mais surtout par une amélioration technologique des procédés.

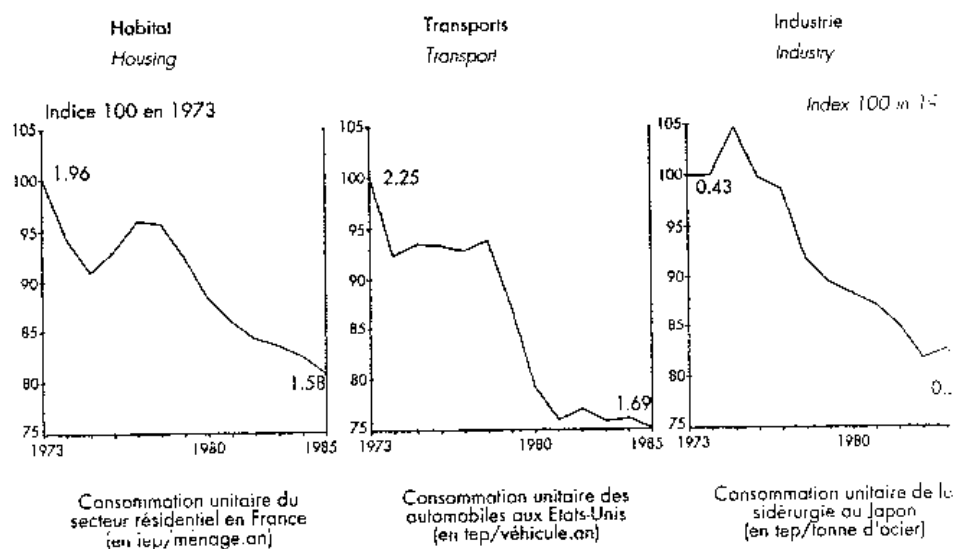
(1) L'exemple de l'Italie est traité dans A. BARSOTTI et al., "The final uses of energy in Italy : 1970-1987", Conférence mondiale de l'énergie, *L'énergie demain*, 1989.

Dans les industries fortement consommatrices d'énergie, l'utilisation de procédés performants du point de vue énergétique est à l'origine de la baisse de la consommation spécifique de combustible (1). Le progrès technique a aussi affecté d'autres secteurs de consommation tels l'agriculture et l'habitat.

Dans l'agriculture, la consommation d'énergie a diminué d'où une amélioration du rendement énergétique. Un exemple : la production de blé dans une zone d'agriculture intensive : de la période 1955-60 à 1985-86, on observe une amélioration du rendement énergétique de l'ordre de 20 % induite par le recours aux engrais NPK, aux produits phytosanitaires et à la mécanisation (2).

Dans l'habitat, le développement de nouvelles techniques relevant de la conception, de la construction ou encore de l'équipement permet une diminution de la consommation énergétique de l'ordre de 25 %. Selon les types de logement construits, les réductions de consommation énergétique sont variables mais en tous cas significatives (3).

EVOLUTION DES CONSOMMATIONS SPECIFIQUES
TRENDS OF UNIT CONSUMPTION



Source : Atlas mondial de l'Énergie, CPE/CNRS, F.PHANABOD, 1989, page 11.

(1) P. CHARTIER, F. MOISAN, "Progrès technologique et amélioration des consommations spécifiques", Conférence mondiale de l'énergie, *L'énergie demain*, 1989, p.9-12.

(2) B. DESSUS, opus cité, p.10-12.

(3) P.CHARTIER, F. MOISAN, opus cité, p.18.

L'impact du progrès technologique sur la réduction des consommations spécifiques concerne l'ensemble des pays industrialisés et touche tous les secteurs économiques.

Aux côtés des efforts d'économies d'énergie, les changements de structure propres au secteur industriel sont responsables du découplage croissance économique - croissance de la consommation énergétique. Cet élément est inévitable dans la mesure où l'on passe d'une société industrielle à une société de services.

Au 19^e siècle, quand les pays d'Europe sont passés d'une économie à dominante agricole à une économie industrielle, il s'est produit une forte augmentation de la demande d'énergie du fait de l'existence de secteurs industriels lourds gros consommateurs d'énergie. Ultérieurement, l'industrie évolue vers des fabrications à plus haute technologie, si bien que la consommation d'énergie croît à un rythme plus lent. Les industries lourdes - sidérurgie, chimie, matériaux de construction - régressant, les industries légères - industries mécaniques notamment - occupent alors une place de plus en plus grande.

Non seulement le développement de secteurs de pointe tels l'informatique, les biotechnologies, l'électronique sont peu consommateurs d'énergie, mais encore les biens qu'ils produisent consomment peu d'énergie eux-mêmes. Le consommateur s'éloigne ainsi des produits à haute intensité énergétique tandis que les industries qui fabriquent ces produits, périssent. De nouveaux besoins à faible intensité énergétique peuvent être satisfaits : loisirs, information, besoins en biens de haute technologie. Le changement dans la nature des consommations est le pendant des effets de structure internes au secteur industriel. Conscients des limites (1) posées par l'utilisation d'agrégats économique ou physique (PIB ou consommation d'énergie), il n'en demeure pas moins que leur observation sur une longue période traduit un changement radical chez les utilisateurs dont l'objectif est la maîtrise des consommations énergétiques.

Face aux chocs pétroliers, les effets combinés des économies d'énergie et des effets de structures internes au secteur industriel ont permis une adaptation relative à l'augmentation

(1) Parmi ces limites : pertinence du PIB comme indicateur de l'activité économique, de la consommation énergétique agrégée en teps et coefficients d'équivalence "production" ou "consommation". Se référer à l'article de D. MAILLARD, "L'élasticité énergie/PIB, sophisme ou panacée", *Economies et sociétés*, série EN, n°1, 1983, p.1837-1838.

des prix des énergies. Sans ce changement majeur, les pays industrialisés fortement dépendants des importations pétrolières pour assurer leur croissance économique, n'auraient pu observer une telle dissociation entre croissance économique et croissance de la consommation d'énergie. (1)

Nous pensons cependant que cette évolution représente bien davantage qu'une simple adaptation à un évènement conjoncturel. Il faut alors observer de plus près la dynamique du progrès technique et souligner qu'il existe une tendance structurelle, dans les usages de l'énergie qui va vers un moindre contenu "matière" de la croissance économique ; les ressources énergétiques contiennent une grande quantité de matière.

Conjointement, la croissance économique contient de plus en plus "d'information". Les travaux de François MEYER (2) peuvent éclairer cette évolution et la rendre intelligible. La dynamique du progrès technique fait apparaître une succession de relais où chaque innovation ayant atteint sa limite, une nouvelle innovation la supplante.

Le rythme auquel les progressions technologiques s'opère tend inéluctablement à s'accélérer. Cependant la course énergétique de l'homme semble parvenue à un stade où elle ne pourrait poursuivre son accélération indéfiniment. Ainsi, l'auteur envisage le prochain relais comme étant non plus énergétique mais informationnel (3). Le relais typique d'évolution est constitué par la technique informatique. La quête d'une efficacité énergétique plus grande serait alors dépassée par une efficacité informationnelle croissante (4).

(1) Une autre limite relative au critère d'intensité énergétique du PIB réside dans son pouvoir peu explicatif d'une situation, il est trop réducteur d'une réalité intégrant des contraintes sociologique et économique. Se référer à l'article de P. OUTREQUIN "Approche macroéconomique du contenu énergétique", *Energétique industrielle*, tome 2, LE GOFF, 1980.

(2) F. MEYER, *La surchauffe de la croissance, essai sur la dynamique de l'évolution*, Collection écologie, Fayard, 1974.

(3) F. MEYER, opus cité, p.61.

(4) L'auteur n'écarte pas les progrès à venir dans la mobilisation des énergies par des procédés plus puissants.

L'avènement de l'outil informatique qu'est l'ordinateur et l'informatisation de la société post-industrielle modifient les composantes de la croissance économique. Le développement des technologies spatiales ou des télécommunications sont des exemples de secteur en pleine expansion recourant largement au support informatique et nécessitant un grand nombre de connaissances pour fonctionner. Cette évolution caractéristique de sociétés avancées ayant accumulé du savoir est tout à fait révélée par l'amélioration des rendements énergétiques constante depuis le développement des sociétés primitives (1). Au fur et à mesure de l'acquisition de connaissances, les inventions d'instruments, de procédés contiennent de plus en plus d'information et conjointement moins d'énergie (2).

Progressivement, le mouvement de dématérialisation s'intensifie avec l'évolution humaine, c'est en quelque sorte une issue à l'incapacité de maîtriser des énergies dont la croissance à l'infinie ne peut se poursuivre. Avec l'informatique, symbole de la dématérialisation, la matière et l'énergie sont seulement des supports accessoires de l'information (3). Il apparaît alors que le découplage énergie-croissance n'est pas le produit du hasard : une adaptation à la hausse des prix énergétiques qui a suivi le premier choc pétrolier. Il appartient à l'évolution humaine et est associé à un niveau de développement particulier. Le progrès technique et l'accumulation de savoirs ont permis aux pays développés de se détacher progressivement de la matière en consommant moins de ressources énergétiques.

La croissance économique devient économe en ressources énergétiques et le développement économique assure l'apparition de nouveaux biens à haute technologie très voraces en information. Le processus de complexification qui accompagne la croissance économique -cette combinaison constitue le développement- implique une grande diversité avec la création de biens contenant de plus en plus d'information-structure et d'information-mes-

(1) F. MEYER, opus cité, p.34.

(2) F. MEYER : "La puissance d'un ordinateur ne se mesure pas en chevaux-vapeur, mais en performance informationnelle", opus cité , p.61. L'unité de mesure de l'information est le bit.

(3) R. PASSET, *L'économique et le vivant*, Payot, 1979, p.158-159.

sage -

René PASSET définit l'information-structure comme une mise en forme, une organisation de l'objet ou d'un système. Cette information mesure ainsi le degré de structuration ou encore le niveau de complexité d'un système (1). Cette idée est illustrée par F. MEYER dans la citation suivante : "une machine n'est telle que pas l'ordre des pièces qui la composent, et chacune de ces pièces est déjà un ordre"(2).

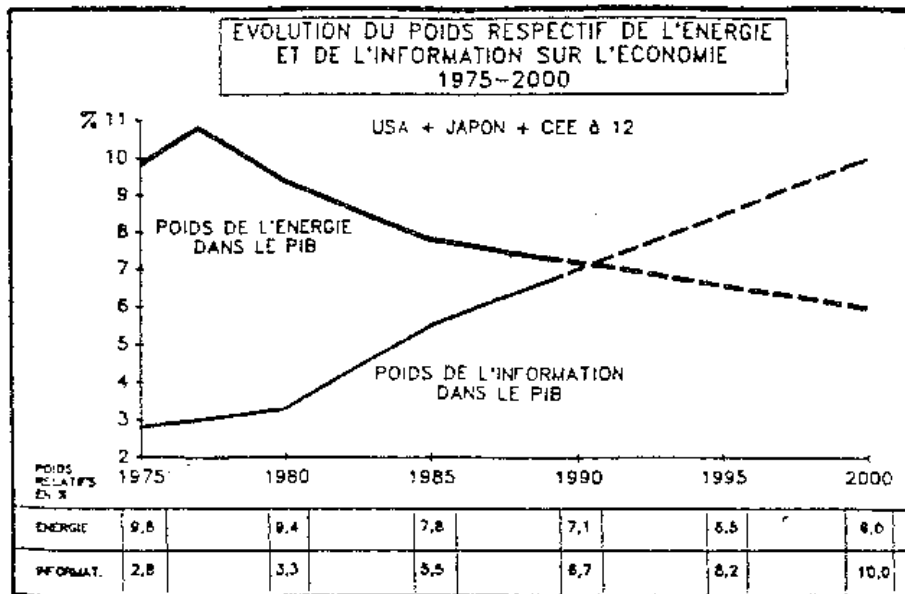
L'information-message contenue dans un système est l'information relative à l'état des différentes parties du système ainsi qu'à l'environnement extérieur de celui-ci (3). Nos sociétés développées disposent ainsi de biens à fort contenu informationnel, dont les limites semblent toujours repoussées plus en avant. L'exemple de l'ordinateur et de l'accélération dans l'accroissement de sa capacité est illustratif. Parallèlement, le poids relatif de l'énergie s'affaiblit. Une étude tout à fait originale a été réalisée par J. BOUVET dans laquelle l'accent est mis sur le rôle du développement des technologies de l'information dans la diminution substantielle de la demande d'énergie (4). L'examen de l'évolution des poids de l'énergie et de l'information relativement au produit intérieur brut depuis 1975 -l'information est appréhendée à travers les technologies- traduit l'inversion de leurs poids relatifs. L'énergie dans le produit intérieur brut des pays développés qui représentait 10 % en 1975, se situe à 7 % en 1990. La tendance est diamétralement inverse pour les technologies de l'information (informatique, télécommunication, ...) qui représentent près de 7 % en 1990 contre à peine 3 % en 1975. Au delà de 1990, le poids de l'énergie représentera 6 % en l'an 2000 et celui de l'information 10 %.

(1) R. PASSET, opus cité, p.99.

(2) F. MEYER, opus cité, p.63.

(3) R. PASSET, opus cité, p.99.

(4) J. BOUVET, "Pour une société plus efficace, énergie et information : le grand confluent" , Conférence mondiale de l'énergie, *L'énergie demain*, 1989, p.1-15.



Source : J. BOUVET, opus cité, page 3.

La composante énergie ne peut cependant être réduite à néant : la création et l'utilisation de l'information ont un coût énergétique. Si le développement des technologies de l'information autorise une diminution de la consommation énergétique, il ne faut pas négliger l'efficacité énergétique. Celle-ci d'ailleurs peut être sans cesse améliorée du fait des progrès des connaissances et d'un traitement de l'information accumulée à l'aide de techniques de modélisation.

La diminution du contenu énergétique de la croissance économique est donc en rapport étroit avec l'accession des sociétés à un niveau élevé du développement. Certes, l'énergie est nécessaire à tous les stades du développement mais son importance relative dépend du niveau de développement atteint. De l'économie de cueillette à l'économie industrielle, les besoins énergétiques des sociétés sont sans commune mesure.

Evolution du budget énergétique individuel au cours de l'histoire de l'humanité
(d'après E. Cook, 1975)

Epoque et type de civilisation	Quantité d'énergie disponible (en kcal personne ⁻¹ jour ⁻¹)				Total
	Alimentation *	Consommation domestique	Industrie et agriculture	Transports	
10 ⁻⁶ ans, début paléolithique	2 000				2 000
10 ⁻³ ans, paléolithique moyen	3 000	2 000			5 000
10 ⁻⁴ ans, début néolithique	4 000	4 000	4 000		12 000
- 600 ans, fin du Moyen âge (Europe du N.O.)	6 000	12 000	7 000	1 000	26 000
- 100 ans, début ère technologique	7 000	32 000	24 000	14 000	77 000
0 (= 1970), civilisation technologique contemporaine	10 000	66 000	91 000	63 000	230 000

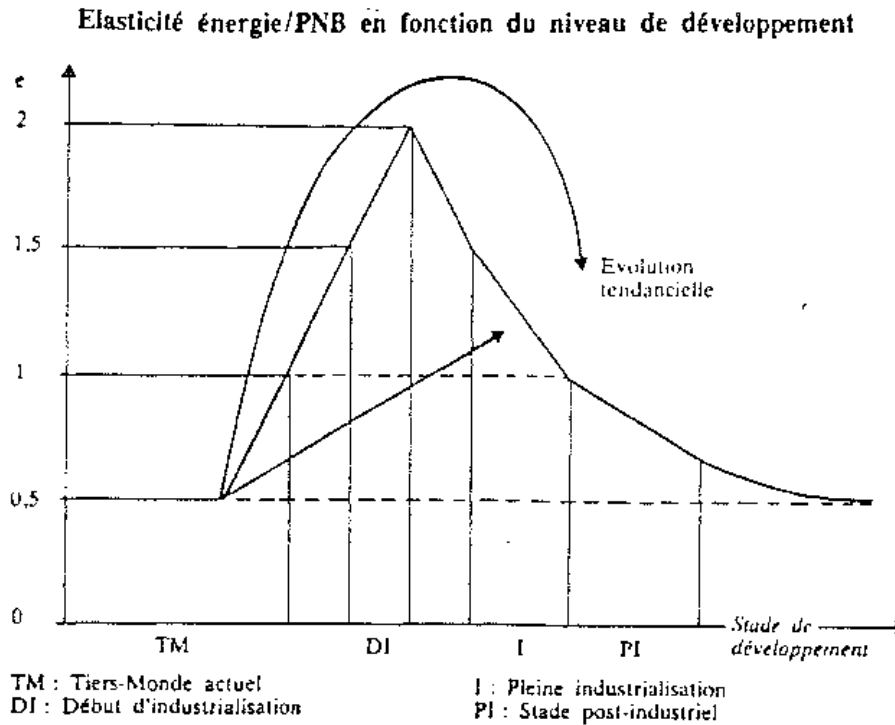
* Ces quantités tiennent compte de l'énergie contenue dans l'alimentation végétale nécessaire pour produire la viande et les produits laitiers consommés par l'homme.

Source : F.RAMADE, Ecologie des ressources naturelles, Masson, 1981, page 37.

La diversification des activités économiques depuis l'ère industrielle n'est pas un processus linéaire dans l'élévation des besoins en énergie. On remarque par ailleurs que la part d'énergie provenant du flux solaire - c'est à dire les besoins alimentaires et la traction animale - n'a cessé de décroître dans le budget total. Avec l'industrialisation, les besoins énergétiques sont satisfaits par le recours aux énergies fossiles. Suivant les stratégies de développement, les pays peu développés peuvent alors se placer de deux manières par rapport aux pays industrialisés : soit ils considèrent qu'ils doivent reproduire la trajectoire de pays industrialisés (passer par des élasticités énergie-PIB élevées puis proches voire inférieures à 1), soit considérer que ce schéma emprunterait en réalité un paradigme technique qui est dépassé, et préférer alors d'éviter le pic de la courbe des élasticités (1). Cela suppose de mettre en oeuvre un modèle de développement original moins vorace en énergie car plus efficace.

(1) HOURCADE J-C, G. MEGIE, J. THEYS, D. CRIMEE, "Modification climatique et réorientation des politiques énergétiques, comment gérer l'incertitude ?", Conférence mondiale de l'énergie, *L'énergie demain*, 1989, p.12.

Le graphique suivant traduit, selon différents niveaux de développement, l'intensité énergétique de la production nationale.



Source : HOURCADE et al., opus cité page 12.

Ainsi, si pour des sociétés caractérisées par une forte tertiarisation des activités et un développement intensif des technologies de l'information, nous pouvons penser que le processus de dématérialisation amorcé caractérisé par l'importance relative de l'information aux dépens de l'énergie va se poursuivre, nous pouvons être plus réservés pour des sociétés peu développées.

La prise en considération de deux variables explicatives : le temps et la population nous amène à nous poser la question de la pérennité du découplage énergie-croissance. L'évolution observée dans les pays industrialisés depuis les années 1970 ne semble pas être remise en cause à l'avenir. Parvenus à un niveau de développement avancée, l'évolution de ces sociétés tend inexorablement vers l'économie des ressources énergétiques comme nous avons pu le voir du fait du développement des technologies de l'information et de l'efficacité énergétique. L'évolution technologique semble aussi conduire logiquement à une diminution des consommations spécifiques dans les pays industrialisés.

Le progrès technique autorise à penser que l'input énergétique sera à l'avenir encore fortement diminué et cela quelque soit l'évolution future du prix du pétrole. Ainsi, dans l'hypothèse de la baisse des prix de cette énergie, la consommation spécifique de combustible doit diminuer (de 30 % en moyenne) d'ici 1995 pour l'ensemble des produits issus d'activités les plus consommatrices d'énergie (1).

Le temps parcouru pour parvenir à ce stade de développement économique a néanmoins été long car à la fois l'accumulation de savoirs et la maîtrise énergétique sont des processus lents. On peut s'interroger alors sur le moment à partir duquel les pays en développement atteindront ce niveau qui leur permettra d'assurer une croissance économique découplée de la consommation énergétique. Un autre phénomène doit être pris en compte pour l'apprécier. Il s'agit de l'évolution démographique.

Dans les pays industrialisés, le découplage énergie-croissance a été favorisé par une stabilisation démographique des populations. La transition démographique est ainsi achevée : le taux d'accroissement annuel en 1985 de la population des pays développés était de 0,6 % (2). Cette transition se définit comme le processus au cours duquel la population passe d'une phase de croissance à l'ultime phase de stabilisation. C'est la phase finale d'une évolution de type logistique. La stabilisation démographique a joué un rôle indéniable dans la diminution de la consommation énergétique des pays industrialisés.

La situation démographique des pays en développement est trivialement opposée : ce n'est pas la stabilisation mais la croissance qui caractérise la population. En 1985, le taux de croissance démographique était de 2 %. Ces sociétés n'ont pas encore accédé à un niveau de développement qui autorise une demande de biens à faible contenu énergétique ainsi qu'une stabilisation de la démographie.

Dans la mesure où elles n'ont pas atteint le stade de développement que connaissent les sociétés post-industrielles aujourd'hui, de tels accroissements de population conduisent inévitablement à l'augmentation de la demande d'énergie. Sans aller plus en avant dans ce do-

(1) P. CHARTIER, F. MOISAN, opus cité, p.12.

(2) F. RAMADE, *Les catastrophes écologiques*, Mc Graw-Hill, 1987, p.25.

maine qui va faire l'objet du paragraphe suivant, nous pouvons comprendre qu'il existe des interdépendances entre les ressources, la population et le progrès technique, et que ces relations ne sont pas neutres vis à vis des équilibres de la biosphère. Dans la mesure où le progrès technique et la dématérialisation des sociétés ont induit un découplage énergie-croissance avec le concours de la stabilisation démographique, la pression exercée sur l'environnement peut être limitée avec un certain retard.

La composante "population" est essentielle : elle est le capital créateur à l'origine du progrès technique et elle est aussi le capital destructeur de l'équilibre énergie-environnement. Elle est en quelque sorte un organisme vivant qui ne survit que parce qu'il se nourrit d'énergie et d'information. Elle est au coeur des changements de mode de développement. L'examen de son évolution dans le temps et de ses besoins en énergie va nous éclairer sur l'adéquation de la disponibilité en ressources énergétiques à l'explosion de la demande, ce qui permettra de mesurer ses impacts sur l'environnement.

§ 2 - La croissance démographique et la relation énergie-biosphère

L'évolution de la population mondiale est un déterminant majeur de la pression exercée par les sociétés à la fois sur les ressources énergétiques et sur l'équilibre des écosystèmes. Dans la mesure où la contribution énergétique va de pair avec le développement des sociétés humaines pendant une longue période et où par ailleurs le progrès technique favorise l'accroissement de la population, une forte croissance des besoins énergétiques est inévitable. Nous allons tout d'abord préciser la nature de l'évolution démographique passée. Nous étudierons dans un second point comment la population interfère avec l'énergie et les équilibres de la biosphère.

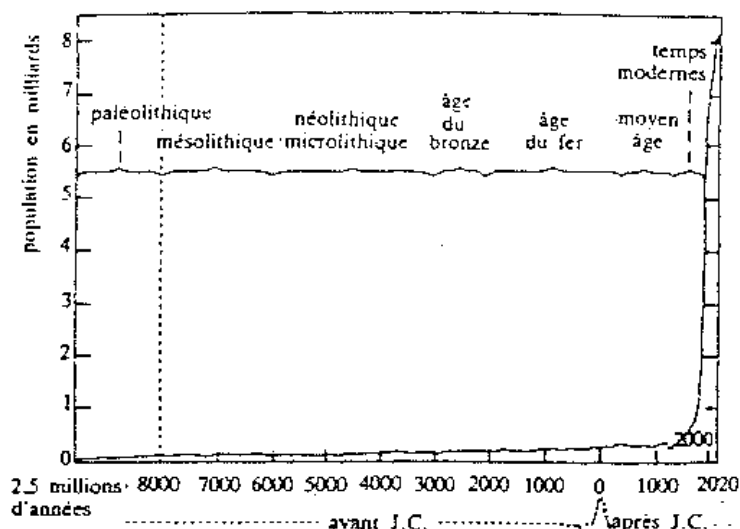
La croissance démographique influence l'offre énergétique et exerce une pression sur les cycles biogéochimiques. Par conséquent, on ne peut traiter la population des pays développés et celle des pays en développement sous un même angle d'approche : les besoins énergétiques correspondant à des niveaux différents de développement sont spécifiques dans les deux groupes de pays. Les effets générés par leurs consommations énergétiques respectives sur la biosphère sont différents aussi. Les interactions entre les ressources énergétiques, la population et la biosphère nous amèneront à délimiter les contours d'un nouvel espace de satisfaction énergétique.

A- Nature de l'évolution démographique

L'évolution de la population mondiale se caractérise par une croissance continue des effectifs, par semée de baisses ponctuelles mineures. L'examen de la croissance démographique passée fait apparaître une accélération de la croissance continue depuis les temps préhistoriques jusqu'à nos jours. Cette croissance a crû non pas à un taux constant mais à un taux croissant. Il s'agit donc d'une croissance surexponentielle (1).

(1) A ce propos, se référer à F. MEYER, opus cité, p.18-22.

Les effectifs humains des origines à nos jours



Source : F.RAMADE, Les catastrophes écologiques, 1987.

La croissance du taux de croissance implique une réduction du temps de doublement des effectifs.

Variation du temps de doublement de la population mondiale depuis le Paléolithique moyen jusqu'à nos jours

Date	Population estimée	Temps de doublement
- 35 000	2,5 millions	env. 25 000 ans
- 10 000	5,3 millions	
- 2 000	133 millions	env. 2 000 ans
- 365 (1620)	500 millions	env. 800 ans
- 175 (1810)	1 milliard	env. 190 ans
- 65 (1930)	2 milliards	env. 120 ans
- 10 (1975)	4 milliards	45 ans
0 (1985)		
+ 31 (2016)	8 milliards	41 ans*

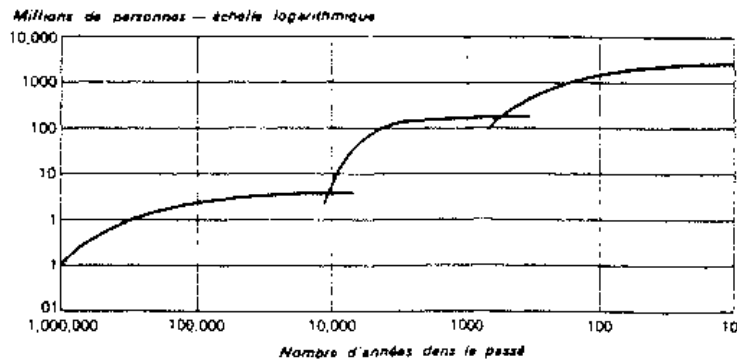
* Extrapolation faite en supposant que le taux d'accroissement actuel se maintienne dans les décennies à venir.

Source : F.RAMADE, Les catastrophes écologiques, 1987.

On observe une accélération de l'accroissement sur la période 1930-1975. Durant cette période, le taux annuel d'accroissement des pays développés décline mais est plus largement compensé par la croissance des taux dans les pays en développement. Il existe donc un phénomène de relais entre pays développés et pays en développement. Plus précisément, vers 1950 on observe une diminution rapide du taux de natalité dans les pays en développement et parallèlement une baisse des taux de fécondité dans les pays industrialisés. La

(1) Commission mondiale sur l'environnement et le développement, *Notre avenir à tous*, 1988, p.119-120.

population des pays développés a atteint une relative stabilité tandis que celle des pays en développement est en pleine expansion. Cette poussée de la croissance n'est pas nouvelle. En effet, dans le passé, on a observé trois décollages de la croissance démographique (1).



Courbe démographique de Decey en coordonnées logarithmiques

Source : J.L.SIMON, op.cité, page 172.

La première explosion traduit la première révolution relative à l'utilisation et à la fabrication des outils, il y a 1 million d'années avant J-C. Avant l'ère agricole, la population était inférieure à 10 millions de personnes. L'accroissement démographique progresse en fonction des ressources de la chasse et de la cueillette maîtrisées par les outils primitifs.

La seconde poussée exprime la seconde révolution relative aux développements de l'agriculture et de l'élevage, il y a 10 millénaires. Au cours du premier millénaire de notre ère, la stabilisation de la population a lieu avec un effectif de 300 millions d'individus. Le seuil est atteint beaucoup plus rapidement que lors de la première explosion démographique.

Enfin, une troisième poussée de croissance est déclenchée à la fin du 18ème siècle avec la révolution industrielle.

Ainsi, l'accélération de la croissance démographique observée depuis la période 1930-1975 appartient à une évolution plus longue amorcée avec l'ère industrielle.

Un seuil de stabilisation devrait être atteint et clore ce troisième décollage de la croissance démographique. Une stabilisation de la population mondiale entre 2050 et 2100 autour de 10 milliards d'individus est l'hypothèse moyenne couramment retenue. L'hypothèse basse se situe à 8 milliards et la stabilisation a lieu d'ici 2050. L'hypothèse haute s'établit à 14

(1) J.L. SIMON, *L'homme notre dernière chance*, PUF, libre échange, 1981, p.171-172.

milliards et la croissance démographique est prolongée au moins au delà de 2100 (1). Selon les études, les données chiffrées sont variables. En 2100, la croissance de la population serait achevée et les effectifs compris alors entre 8,5 et 11,5 milliards (2). Malgré les incertitudes sur les chiffres, il y a une quasi-certitude sur la stabilisation future de la population mondiale. Les projections démographiques reposent sur l'observation de la croissance de la population. Son évolution est considérée comme la succession de deux phases constitutives d'une courbe en S ; il s'agit de l'évolution logistique.

Une première phase d'accélération de la croissance démographique accompagne le passage d'une économie de subsistance à une économie industrielle basée sur l'énergie. Une seconde phase de stabilisation et d'arrêt de la croissance démographique accompagne le passage de l'économie fortement consommatrice en ressources énergétiques fossiles à une économie basée sur l'information. Cette transition s'est déjà opérée dans les pays développés et devrait d'ici la fin du 21^{ème} siècle se réaliser dans les pays en développement. Il est important de noter que les deux extrémités de cette transition démographique relèvent de différentes régulations (3).

Avant la transition, la démographie est contrainte par les ressources. Seuls les progrès réalisés dans les techniques d'exploitation et de mise en valeur des ressources permettent de repousser toujours plus loin les limites imposées par les écosystèmes terrestres. La disponibilité des ressources est une contrainte fondamentale. La technologie a cependant permis à plusieurs reprises dans l'évolution humaine de dégager des degrés de liberté.

Après la transition, la démographie n'est plus régulée par les ressources mais par les comportements, les modes de vie des individus. Après avoir subi la limitation des ressources naturelles, les individus peuvent assurer une régulation qui tend à la stabilisation de la population. Il y a équilibre entre population et ressources.

L'hypothèse de la transition démographique représentée par la courbe en S, a des répercussions importantes sur la relation population-ressources naturelles. Le développement économique peut être accompagné de surplus de ressources notamment alimentaires dans la mesure où la croissance de la population ne suit pas le même rythme que celle des res-

(1) P-H BOURRELIER, R. DIETRICH, *Le mobile et la planète*, Economica, 1989, p.35-36.

(2) P. CROSSON, "Agricultural development - looking to the future", in WC. CLARK, R.E. MUNN, *Sustainable development of the biosphere*, IIASA, 1986, p.105-106.

(3) P-H BOURRELIER, R. DIETRICH, opus cité, p.33.

sources en biens satisfaisants les besoins vitaux (alimentation, énergie) (1).

Cependant, l'acceptation ou le refus de la croissance logistique de la population mondiale sont redevables de l'appréciation humaine. Le niveau d'acceptabilité est loin d'être acquis. Il nous faut revenir ici sur la définition de la fonction logistique pour comprendre que l'évolution de la population mondiale à venir peut être sujet de contro-verse.

Une évolution logistique par définition, rend compte d'une évolution tendant naturellement à un état d'équilibre dans un milieu limité en ressources. Le milieu agit comme régulateur de l'évolution de la population. Toute espèce vivante se trouve ainsi confrontée à la résistance du milieu qui s'oppose d'autant plus aux accroissements de ses effectifs que la population devient plus nombreuse (2). Le niveau de la population tend vers une limite, limite imposée par la finitude des ressources disponibles.

Ainsi, après une phase d'expansion exponentielle, une phase de décélération du taux de croissance est amorcée du fait de la concurrence vive entre les individus, jusqu'à amener la population à un niveau compatible avec les ressources du milieu. Cet effectif correspond à la capacité limite du milieu ou "carrying capacity". La population limite est stable et le système est alors en équilibre. C'est le mathématicien VERHULST T.R. qui a proposé en 1838 une théorie de la croissance des populations dans un environnement limité. Son modèle est en fait l'expression mathématique du paradigme malthusien, paradigme traduisant la contradiction entre la croissance géométrique d'une population et la progression arithmétique des ressources naturelles.(3)

L'expression de la fonction logistique s'écrit : $R = r (1 - N/k)$ où "R" exprime le taux de croissance, "N" l'effectif, "r" le taux intrinsèque d'accroissement naturel et "k" l'effectif maximum que peut supporter l'écosystème.

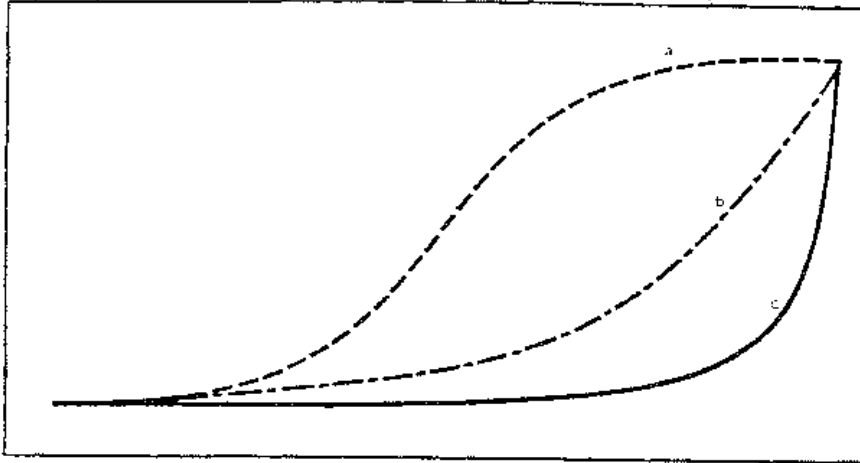
Est-il légitime de croire que l'évolution de la population mondiale est une évolution logistique ? Dans ses travaux, F.MEYER explique que la population dans son évolution ne tend pas vers une valeur limite en équilibre avec la planète, milieu limité. Il est clair que si l'expansion démographique pouvait être considérée comme la phase d'accélération d'une évolution de type logistique, le point d'inflexion où débute la décélération et la population limite

(1) J-P DELEAGE, *Histoire de l'écologie*, La découverte, 1991, p.147-151.

(1) P-H BOURRELIER, R. DIETRICH, opus cité, p.33.

(2) F. RAMADE, *Ecologie des ressources naturelles*, 1981, Masson, p.26-29.

pourraient être prévus. Or, selon l'auteur, il n'en est rien. Il n'est pas possible d'ajuster la branche ascendante d'une courbe logistique aux valeurs de la population mondiale (1).



a : courbe logistique entière

b : branche ascendante de la courbe logistique

c : courbe observée

Source : F.MEYER, op.cité, page 31.

La prise en compte du progrès technique et sa relation avec la population explicite pourquoi l'expansion démographique caractéristique de l'évolution de la population ne se conforme pas à la loi logistique. Tout progrès technique implique un progrès dans la mobilisation des ressources et autorise ainsi une population plus nombreuse au sein du milieu (2). La notion de milieu limité n'est pas applicable à l'évolution de la population humaine. Les progrès techniques successifs ont repoussé le plafond fixe représenté par les ressources du milieu. Le milieu n'est donc pas fixé mais évolutif car fonction de l'état des techniques.

Tout progrès technique, en repoussant les limites du milieu, implique l'expansion de l'espèce humaine. A la logique du milieu limité, s'oppose une logique du milieu élastique. Ainsi,

(1) F. MEYER, opus cité, p.30-31.

(2) L'idée que l'ampleur du progrès technique est fonction de la croissance démographique est largement explicitée dans J.L. SIMON, *l'homme notre dernière chance*, PUF, 1981, p.213-234.

la notion de population limite perd son sens. L'évolution démographique s'affranchit de la condition du milieu limité, caractéristique d'une évolution logistique (1). Elle est pour l'auteur parfaitement représentée par une évolution surexponentielle autoaccélérée.

L'accroissement de population rétroagit non pas négativement - comme dans le cas d'une évolution logistique - mais positivement sur la probabilité de survie du fait de l'efficacité des stratégies technologiques résultant de la coalition (entente entre les individus face à l'adversaire "nature"). La croissance toujours plus accélérée de la population n'a donc rien à voir avec la loi logistique.

Nous nous trouvons alors devant une aberration très grave : si l'évolution passée de la population n'est pas logistique, comment concevoir que les prévisions démographiques s'appuient sur l'existence de la courbe en S ?

Certes nous avons pu observer des changements de grande ampleur lors du dernier million d'années avec trois décollages successifs de la croissance démographique. Dans les deux premiers, il s'agissait d'évolutions de type logistique où la diminution du taux de croissance de la population résultait du milieu limité : chaque fois que les procédés techniques étaient exploités en totalité, le taux de croissance chutait. La population a décliné à chaque fois que les gains de productivité initiaux réalisés grâce aux technologies nouvelles mises en oeuvre ont été exploités.

Cependant, la suraccélération à laquelle la population mondiale est soumise depuis 1750, début de la troisième poussée démographique et de l'ère industrielle, ne semble pas terminée. Il est donc difficile de prévoir si effectivement elle va être contrebalancée par des facteurs limitants d'où résulterait un équilibre de la population stabilisée, ou au contraire, compte tenu du décalage entre les pays développés - déjà stabilisés - et les pays en développement, ceux-ci vont continuer leur progression démographique et assurer le maintien de la croissance surexponentielle observée depuis des millénaires.

L'acceptation de la courbe en S est légitimée par l'expérience des pays développés parvenus à réguler leur évolution démographique d'où une stabilisation des effectifs. Cependant cette stabilité peut-elle perdurer ? Est-on sûr qu'il n'y aura pas une croissance ou une décroissance dans les siècles à venir ?

Les travaux de F. MEYER ont le mérite d'avoir étudié l'évolution démographique et l'évolution technologique depuis l'origine de l'homme. L'homme a pu s'adapter grâce à la techni-

(1) F. MEYER, opus cité, p.50.

que de manière efficace : les progrès techniques assimilés ont permis la croissance démographique ainsi que son accélération constante au cours du temps.

Cependant, l'auteur souligne que la dynamique démographique doit connaître à l'avenir une violente décélération (1). Il se pourrait ainsi que l'évolution de la population soit victime d'une rupture sans précédent.

La croissance démographique surexponentielle ne peut donc être indéfinie. La pression sur les ressources naturelles qu'elle a exercée au cours des siècles a induit des perturbations majeures au sein de la biosphère qui pourraient bien remettre en cause le développement des sociétés humaines, notamment dans des sociétés encore peu développées. La satisfaction des besoins énergétiques croissants dans les pays en développement où la croissance démographique est rapide peut être rendue difficile par la prise en compte des équilibres de la biosphère. Cette contrainte de nature écologique est ainsi appréhendée comme la limite du milieu physique dans lequel évoluent les sociétés. L'hypothèse d'une stabilisation de la population mondiale dans ce contexte constitue un scénario probable d'ici la fin du 21^{ème} siècle.

L'enjeu énergétique prend toute sa dimension si l'on considère l'espace qu'est la biosphère comme limité. Il consiste à assurer une disponibilité en ressources énergétiques suffisante pour un monde stabilisé autour de 10 milliards d'individus et à accomplir parallèlement la poursuite du développement économique dans un environnement contraint par le nécessaire respect des équilibres des écosystèmes. Le système énergétique va devoir fonctionner de manière plus efficace afin de réduire les effets négatifs de son fonctionnement. Atteindre le palier lointain de la stabilisation démographique suppose d'adapter ce système afin d'éviter - nous verrons dans quelle mesure - toute tension sur les ressources et sur les écosystèmes. Il s'agit donc de montrer que le sentier qui conduit à la stabilisation n'est pas sans effet sur la biosphère. Le temps qui nous sépare de la stabilisation est d'un siècle. Durant cette période, des ruptures peuvent apparaître.

Dans le point suivant, nous allons mettre en évidence ces ruptures potentielles, ruptures issues de la croissance démographique qui va se poursuivre d'ici la fin du 21^{ème} siècle et aggraver à la fois les pressions sur les ressources énergétiques et sur les écosystèmes.

(1) F. MEYER, opus cité, p.105.

C'est aussi le sens des travaux menés par une équipe du Massachusetts Institute of Technology et de D. MEADOWS, "The limits to growth", ou "Halte à la croissance", Fayard, 1972.

B - Transition démographique, ressources énergétiques, biosphère : les correspondances

La croissance des populations joue un rôle important dans l'évolution des besoins énergétiques. L'examen de la densité démographique et celui de l'utilisation des ressources par habitant peuvent être révélateurs des pressions exercées sur les ressources énergétiques et sur les équilibres des écosystèmes. Ces deux tendances d'évolution expliquent comment les pays industrialisés ont réalisé leur développement à la fin du 18ème siècle. L'exemple de l'Europe est révélateur. En 1750, c'est en Europe que l'on observe les plus fortes densités de population, comparables à celles de la Chine (1). De nombreuses découvertes scientifiques et innovations accompagnent la croissance du taux de croissance démographique. Le recours aux ressources fossiles pour satisfaire à l'accroissement de la demande des industries et du secteur agricole implique corrélativement un accroissement des émissions de gaz carbonique. Parvenue à un stade avancé de développement, on observe à présent une stabilité de la densité, l'accession à un palier d'ici le milieu du siècle prochain avec à la fois la stabilisation démographique et la stabilisation de la consommation énergétique par habitant.

Cependant, un siècle après l'ère de l'industrialisation, les effets sur la biosphère sont visibles à travers de nombreux symptômes tels l'acidification des pluies, la teneur en gaz carbonique atmosphérique élevée. Nous ne reviendrons pas sur les perturbations induites au sein des cycles biogéochimiques ; nous rappelons simplement ici qu'il faut prendre en compte des décalages temporels entre le moment où la révolution industrielle s'est opérée et le moment où ses effets ont été repérés et mesurés. Si l'on examine la situation des pays en développement, on doit prendre en compte ces décalages afin de rendre compatible la croissance démographique - et l'augmentation des besoins énergétiques qu'elle engendre - avec la disponibilité en ressources énergétiques ainsi qu'avec l'espace physique dans lequel ces relations s'établissent. Tout dérapage peut être comprometteur pour le développement économique de telles sociétés peu développées : l'énergie peut constituer à l'avenir un goulot d'étranglement au développement très grave (2). Il est nécessaire que les ressources énergétiques disponibles soient suffisantes pendant la période de transition longue qui doit amener la stabilisation des populations sous-développées.

Cependant, dans le cas des ressources fossiles, ce sont plus les problèmes d'environne-

(1) W.C.CLARK, "Sustainable development of the biosphere : themes for a research program", in W.C. CLARK, R.E. MUNN, opus cité, p.25-27.

(2) Conférence mondiale de l'énergie, Synthèse des travaux, *Energie, besoins, espoirs*, 1986, p.262.

ment que leurs raretés relatives qui peuvent faire blocage au développement économique. Cela n'a pas été le cas des pays aujourd'hui industrialisés dans leur transition démographique car les effets de la transformation des ressources à l'échelle de la biosphère ou des écosystèmes n'étaient pas visibles et de plus, dans la mesure où le progrès technique permettait d'opérer des substitutions interénergétiques et par conséquent minimisait les risques de pénurie, le développement économique pouvait poursuivre son chemin. Afin de mettre en évidence les points de rupture durant la transition démographique, nous allons examiner l'évolution à venir de la consommation d'énergie et le poids des pays en développement par rapport aux pays industrialisés au sein de cette tendance. Il faudra en tirer des implications majeures pour la relation énergie-biosphère et finalement conclure à l'intérêt d'un développement prioritaire des sources d'énergie renouvelables.

Considérant les données relatives à la consommation d'énergie et à l'état de la croissance démographique, une augmentation de la consommation mondiale d'énergie est inévitable d'ici la fin du 21^{ème} siècle. En 1987, 7,8 milliards de tep ont été consommés pour une population de 5 milliards d'individus. La moyenne mondiale s'est établie à 1,6 tep par habitant. Six milliards de tep ont été consommés par les pays industrialisés tandis qu'ils représentent seulement un quart de la population mondiale. Ainsi la consommation énergétique par habitant des pays industrialisés est 10 fois plus élevée en ce moment que dans les pays en développement (1). Dans les pays industrialisés, la consommation d'énergie par tête s'est stabilisée à un niveau élevé. Au contraire, dans les pays en développement, elle se situe à un niveau très bas et n'est pas stable du fait de la croissance démographique et du faible niveau de développement. L'accroissement de la consommation mondiale dépend donc beaucoup des pays en développement. Les projections retenues s'appuient sur les résultats de l'étude de J.R FRISCH lors de la conférence mondiale de l'énergie en 1986 (2).

(1) J-C HOURCADE, G. MEGIE, J. THEYS, "Politiques énergétiques et risques climatiques, comment gérer l'incertitude ?", *Futuribles*, septembre 1989, p.47.

(2) J-R FRICSH, *Abondance énergétique, mythe ou réalité ?*, Conférence mondiale de l'énergie, 1986, Ed. Technip.

PROJECTIONS DE POPULATIONS

en millions	1980	2000	2020	2040	2060
pays industrialisés	1 217	1 402	1 554	1 629	1 674
tiers monde	3 236	4 721	6 253	7 350	8 012
monde	4 453	6 123	7 807	8 979	9 686

CONSOMMATION D'ENERGIE PRIMAIRE(*)

Gtep	2000	2020	2040	2060
pays industrialisés	7,5 - 8,5	9,7 - 11,7	11 - 14	12 - 16,7
tiers monde	3,5 - 4,5	5,3 - 8,3	7 - 12	9 - 16
monde	11 - 13	15 - 20	18 - 26	21 - 33

(*) : les valeurs hautes de la fourchette correspondent à l'hypothèse d'un prélèvement intense sur les réserves. Les valeurs basses correspondent à l'hypothèse de base.

Avec une population en 2060 près de 5 fois plus élevée que celle des pays développés, la consommation d'énergie primaire des pays en développement est du même ordre de grandeur. La consommation d'énergie, sous l'effet de la croissance démographique, a fortement augmenté de 2000 à 2060 (multipliée par 3 à 4). Compte tenu de l'importance des effectifs observés, la consommation d'énergie par habitant demeure faible.

CONSOMMATIONS D'ENERGIE PRIMAIRE PAR HABITANT

(en tep) - hypothèse de base

	1980	2000	2020	2040	2060
pays industrialisés	4,59	5,44	6,28	6,71	7,11
tiers monde	0,60	0,74	0,86	0,97	1,10
monde	1,69	1,81	1,94	2,01	2,14

Il subsiste donc un écart considérable en matière de consommation entre les deux groupes de pays, écart révélé par la consommation énergétique par tête. Cependant, à la lecture de ces tableaux, il n'apparaît pas la consommation énergétique selon les différentes sources d'énergie.

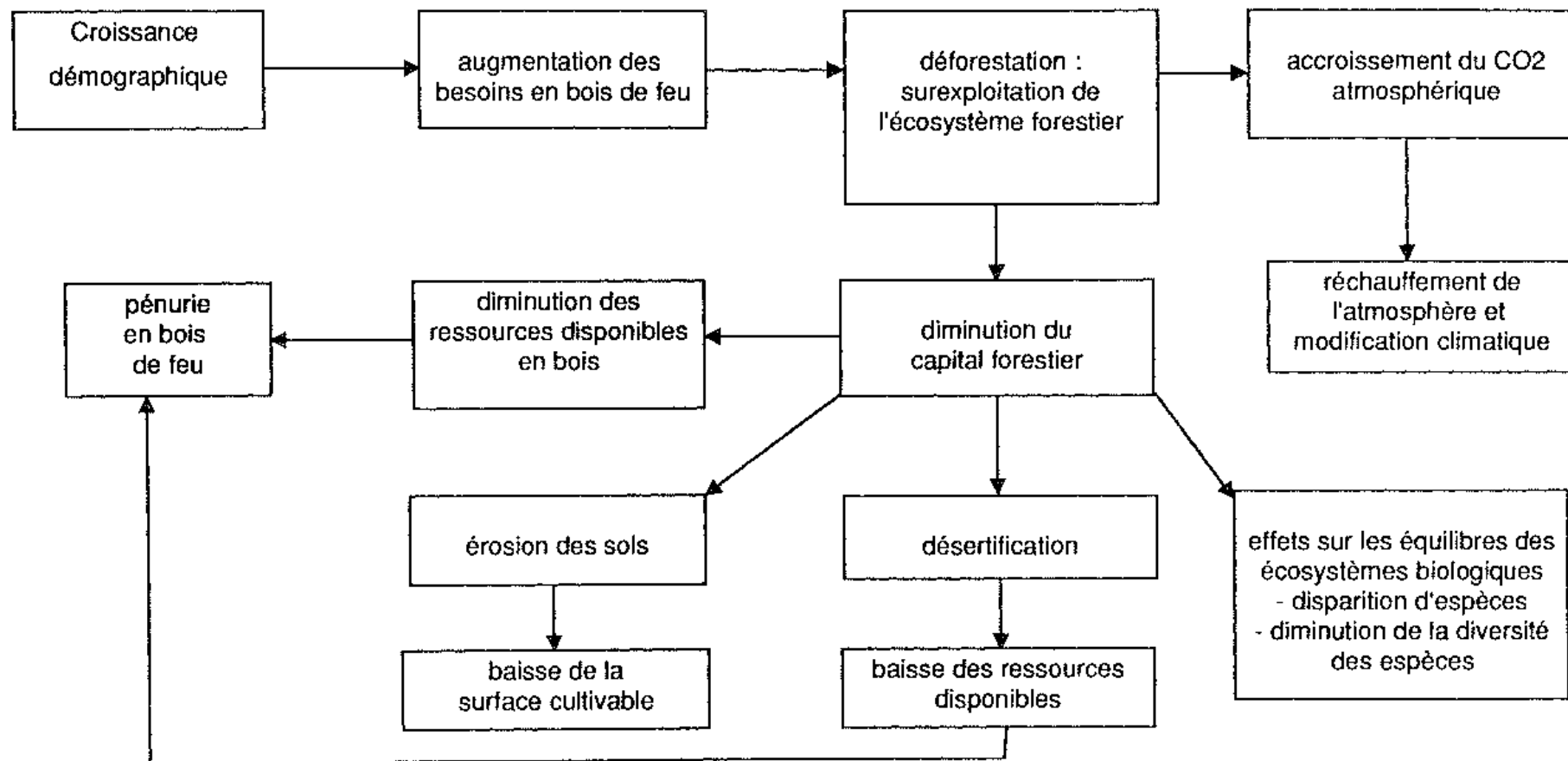
Il convient d'examiner de plus près les caractéristiques de la demande énergétique et de mettre en évidence les ressources qui seront les plus sollicitées à l'avenir. Les besoins énergétiques dans les deux groupes de pays reflètent les différents niveaux de développement. D'un côté, les pays développés s'appuient largement sur les ressources énergétiques fossiles mises en valeur au moyen de convertisseurs artificiels. De l'autre côté, les pays en développement s'appuient surtout sur l'énergie captée au moyen de convertisseurs biologiques. Cette différence est fondamentale. Son fondement est historique. Les pays industrialisés issus pour la plupart d'une révolution industrielle ont poursuivi leur développement sur la base du pétrole, charbon et de l'énergie nucléaire. Les besoins énergétiques primaires sont donc largement satisfaits par des énergies fossiles.

Au contraire, les pays en développement n'ont pas achevé leur développement industriel. Ils sont au stade du développement pré-industriel. Le poids du secteur agricole y est prépondérant. Les besoins énergétiques sont essentiellement couverts par les énergies animales et biologiques. Ainsi, le bois, la paille, les déchets de l'agriculture ou les déjections animales restent de nombreux PVD des sources d'énergie essentielles pour le développement des communautés rurales et urbaines. La source la plus importante est généralement constituée par le bois : il fournit de 40 à 95 % de la consommation totale des pays en développement (1). La collecte du bois et des sous-produits agricoles et animaux permet de satisfaire les besoins en cuisine, chauffage et éclairage dans les zones rurales. Le bois est très présent dans les villes où il est vendu en l'état ou après transformation en charbon. Les besoins des citadins sont cependant 2 à 3 fois supérieurs à ceux des populations rurales.

La croissance démographique en impliquant une augmentation des besoins énergétiques conduit à une récolte excessive de bois et contribue de manière significative à la déforestation et à la dégradation des sols. Cette pression exercée par la croissance démographique sur la ressource en bois dépasse parfois la capacité limite du milieu ou capacité de charge (voir schéma page suivante) : l'augmentation de la consommation de bois s'effectue alors au détriment du capital biologique.

(1) Conférence mondiale de l'énergie, Synthèse des travaux, *Energie, besoins, espoirs*, 1986, p.364-365.

SCHEMA DES INTERACTIONS ENTRE CROISSANCE DEMOGRAPHIQUE ET PENURIE EN BOIS DE FEU DANS LES PAYS EN DEVELOPPEMENT ET CONSEQUENCES ECOLOGIQUES



→ risque de destruction irréversible de l'écosystème forestier

Ce n'est donc pas le prélèvement de l'intérêt produit par la forêt - sa productivité biologique - qui permet la satisfaction de la consommation accrue (1). La capacité limite du système forestier n'est donc pas respectée et le potentiel forestier est surexploité. On observe cette situation en Afrique Sub-saharienne notamment.

Pays sub-sahariens. Consommation de bois de chauffe comparée à l'accroissement annuel des réserves

Pays	Année	Accroissement annuel moyen des ressources en bois (1.000 m ³ /an)	Consommation de bois de chauffe (1.000 m ³ /an)	Différence entre consommation et ressources supplémentaires (1.000 m ³ /an) , %	
Mauritanie	1980	97	963	866	893
Sénégal	1981	7.200	4.800	- 2.600	- 36
	2001	6.300	7.200	900	14
Niger	1980	1.400	4.100	2.700	193
	2000	1.000	7.200	6.200	620
Sahel	1980	17.000	22.000	5.000	30
	2000	15.000	34.000	19.000	127
Nigéria Nord	1980	13.500	23.300	9.800	73
Ethiopie	1982	13.600	34.000	20.400	150
Soudan	1980	44.400	75.800	31.400	71
Zimbabwe	1982	10.400	11.700	1.300	12,5
	2000	6.100	19.700	13.600	223

Source: ONUDI

Conférence mondiale de l'énergie, Synthèse des travaux, 1986.

D'autres systèmes biologiques tels les pâturages, les cultures voient leur équilibre menacé par l'explosion démographique. La déforestation déjà perceptible dans de nombreux pays en développement risque de se poursuivre et le fossé entre la disponibilité en bois et la population va tendre à s'accroître. Nous sommes en présence d'une catastrophe écologique au sens où la définit F.RAMADE .

(1) F. RAMADE, "Les catastrophes écologiques, une menace pour l'avenir de l'humanité", *Futuribles*, Juillet-août 1989, p.67.

L'évènement, ici la déforestation, induit des perturbations au sein des processus écologiques, et diminue notamment, la productivité biologique. Il peut aboutir à la destruction irréversible de l'écosystème concerné. Des rythmes accélérés de déboisement sont observés aussi en Asie ou encore en Amérique du Sud.

L'exemple de la Chine est révélateur des pressions exercées sur les ressources naturelles par une population essentiellement rurale. L'emploi de la biomasse -bois, déchets de l'agriculture, déjections animales- permet de satisfaire 85 % des besoins énergétiques de la population rurale (1). La population principalement rurale, compte 800 millions de paysans : afin de satisfaire leurs besoins en bois de feu, les ressources en bois sont largement sollicitées, d'où des millions d'hectares de forêts abattus. Parallèlement, l'abattage est effectué pour faire la place aux cultures de céréales. Après avoir conduit à la disparition d'un quart de la couverture forestière dans ce pays de 1950 à 1980, les prémices d'une crise écologique majeure font leur apparition dans les domaines de l'eau et des pollutions (2). Seulement 12 % de son territoire est couvert de forêts contre 33 % en moyenne dans les autres pays du monde. On a ainsi dépassé la capacité limite du milieu pour satisfaire aux exigences de la croissance démographique sans se préoccuper des retombées sur les équilibres des écosystèmes.

Les sécheresses plus fréquentes, l'accélération de l'érosion ou encore l'extension des déserts sont autant de manifestation de la crise écologique en Chine. Dans des pays où le poids de la population rurale, la pression exercée sur le capital forestier pour satisfaire leurs besoins vitaux est très exacerbée par la croissance démographique. On peut espérer que les structures agricoles vont évoluer et échapper progressivement à l'insuffisance énergétique en ressources commerciales (3). Le déficit d'électricité et le manque de production d'énergie dans les zones rurales sont un problème fondamental. La consommation d'énergie par habitant est de 0,12 tep par an dans l'agriculture alors que la moyenne du pays est environ 4 fois plus élevée. D'où une sous-utilisation des équipements agricoles ainsi que du réseau électrique (4). Le développement des matériels agricoles, l'augmentation des rendements, l'utilisation d'engrais vont contribuer à accroître les besoins énergétiques du secteur agricole qui en 1980, ne consommait que 7 % de l'énergie totale commerciale (essentielle-

(1) Conférence mondiale de l'énergie, opus cité, p.327.

(2) J. THEYS, "L'environnement et les ressources au 21ème siècle", *Futuribles*, novembre 1987, p.11.

(3) Il s'agit du pétrole, du charbon et de l'électricité.

(4) Conférence mondiale de l'énergie, opus cité, p.327

ment du charbon).

Non seulement l'agriculture mais aussi les transformations des secteurs industriels avec notamment le développement d'industries de base va nécessiter une plus grande consommation d'énergie commerciale. L'insuffisance énergétique qui est estimée globalement à 20 % dans le domaine industriel va donc devoir être dépassée pour permettre le développement économique en Chine. Dotée d'importantes ressources énergétiques, ce pays en développement a choisi de baser un développement économique sur la production d'énergie nationale (1). Ses productions charbonnières et pétrolières vont considérablement augmenter pour satisfaire une forte augmentation de la demande (1560 Mtec en 2000 contre 707 Mtec en 1984). Son réseau électrique va être développé : accroissement de l'hydraulique (de 35 Mtec en 1984 à 92 Mtec en 2000).

L'augmentation de la consommation d'énergie commerciale va se poursuivre au fur et à mesure de la diversification des activités industrielles et du développement d'une agriculture moderne. Conjointement, l'évolution de la population se poursuit dans le sens de la croissance : en 2100, elle se situe autour de 1,5 milliard d'individus (2). Tout va dépendre de l'efficacité de la politique anti-nataliste poursuivie dans le pays et de la volonté d'accélérer la transition démographique. Il est vrai que le taux de croissance a chuté de 2,37 à 1,17 % par an sur la période 1972-1982 (3). Une stabilisation de la population à un niveau acceptable est envisageable au cours du 21ème siècle. La régression des effectifs en dessous d'un milliard est même envisagée (650 millions d'habitants) (4).

Compte tenu du développement et de l'évolution démographique, il est alors indispensable de reconsidérer le patrimoine forestier tout en diversifiant les approvisionnements énergétiques localement.

Une politique de reforestation a été lancée et poursuit l'objectif d'accroître la superficie des forêts de 50 % d'ici l'an 2000 (5). L'utilisation de micro-centrales hydrauliques de l'énergie solaire, de l'énergie éolienne, ou encore de l'énergie géothermale dans de nombreuses régions du pays peuvent contribuer à la satisfaction des besoins énergétiques d'une popula-

(1) Conférence mondiale de l'énergie, opus cité, p.163.

(2) J. THEYS, opus cité, p.6.

(3) F. RAMADE, *Les catastrophes écologiques*, p.53.

(4) opus cité, p.54.

(5) J. THEYS, opus cité, p.11.

tion essentiellement rurale. Les besoins en éclairage, thermique ou encore en eau pour l'irrigation des cultures peuvent être localement satisfaits par de telles sources d'énergie (1). L'emploi de la biomasse à des fins énergétiques va nécessairement se développer dans une agriculture fortement dépendante de cette ressource pour de nombreux usages. La combustion directe des déchets agricoles ou du bois a des rendements très faibles (de l'ordre de 10 % d'où un important gaspillage). Ainsi, toute amélioration de l'usage de la biomasse constitue un moyen efficace qui peut à la fois économiser la ressource disponible et garantir la satisfaction de besoins croissants.

Le développement du biogaz en Chine est une réponse au dilemme raréfaction des ressources forestières - besoins ruraux. Dans une agriculture dont le développement pouvait être considéré comme limité à la fois par le manque d'énergies commerciales et la crise écologique engendrée par la surexploitation du capital forestier, la transformation de la biomasse par le procédé de digestion anaérobie (2) offre depuis plusieurs années une réponse satisfaisante aux besoins ruraux. Développé à l'origine pour palier à la pénurie du fuel dans les zones rurales, il permet actuellement de réduire la pression sur les ressources en bois du pays tout en assurant le développement de l'agriculture (3). Les digesteurs alimentés en déjections animales et humaines ainsi qu'en déchets de l'agriculture offrent ainsi une production importante de biogaz ou méthane et de matières solides riches en azote, phosphore et potassium.

Le biogaz se substitue ainsi au fuel et au gas oil pour les besoins d'électricité et de force motrice. En 1984, on dénombrait 882 stations électriques alimentées en biogaz avec une capacité installée de 9025 kw (4). Il se substitue au bois pour la cuisson des aliments et permet de respecter l'équilibre de l'écosystème forestier. La construction d'unité de production de biogaz permet le développement de l'élevage et l'élévation des rendements des cultures : les matières azotées et phosphorées issues du processus peuvent être utilisées comme fertilisants ainsi que pour l'alimentation des animaux. Depuis quelques années, la production et l'utilisation du biogaz ont même été étendues des zones rurales aux zones urbaines.

(1) D. KEYUN and al., "One way to tackle the rural energy problem in China", Conférence mondiale de l'énergie, *Energie, besoins, espoirs*, 1986, p.4.

(2) A propos du procédé, voir : OCDE/AIE, *Sources d'énergie renouvelables*, p.246.

(3) L. CHENGXIAN, "The up to date state and the future development of biogas construction in China", *Energie, besoins, espoirs*, Conférence mondiale de l'énergie, 1986, p.8-9.

(4) L. CHENGXIAN, opus cité, p.6.

Il est ainsi possible de réconcilier le développement des communautés rurales avec le maintien des équilibres des écosystèmes : le biogaz est un exemple de préservation de la ressource en bois face à l'accroissement des besoins. En mettant en valeur les déchets inhérents à toute activité humaine, il offre non seulement la possibilité de satisfaire des besoins vitaux - cuisson, éclairage - mais aussi les besoins liés au développement des activités agricoles - engrais, force motrice.

La Chine se caractérise finalement comme un pays doté d'un énorme potentiel énergétique fossile et renouvelable qui, sous la pression de besoins croissants et de la contrainte environnementale, essaie d'orienter les substitutions inter-énergétiques mettant en oeuvre des stratégies énergétiques originales. Compte tenu de son évolution démographique et de son développement économique basé sur une économie rurale traditionnellement consommatrice en énergie non fossile, l'évolution de la consommation énergétique jusqu'au milieu du siècle prochain est caractérisée par une forte croissance des énergies non fossiles et parallèlement une forte réduction de la consommation d'énergies non commerciales sous l'effet d'une baisse de la part du bois. Le développement du secteur industriel implique parallèlement des consommations plus importantes de pétrole, gaz naturel et indirectement d'uranium pour la production d'électricité.

	1985	2020	2060
consommation d'énergie fossile (10^6 tep/an)	501 (66 %)	822 (77 %)	1 389 (79 %)
consommation d'énergie traditionnelle (bois, déchets, agriculture, ...)	234 (31 %)	167 (15 %)	91 (5 %)
consommation d'énergie non fossile (*)	21 (3 %)	83 (8 %)	277 (16 %)
consom. d'énergie totale	756	1 072	1 757
population (10^6 hab.)	1 042	1 361	1 673

(*) solaire, hydraulique, ...

Source : d'après J.C HOURCADE, G.MEGIE, J.THEYS, op.cité, page 39.

On observe dans d'autres pays des stratégies énergétiques visant à reconsidérer le rôle des

énergies renouvelables dans le développement économique et à envisager une utilisation compatible avec les équilibres des écosystèmes notamment forestiers.

L'Inde s'inscrit aux côtés de la Chine dans cette voie depuis quelques années. Cependant, elle demeure menacée de désertification accélérée car elle a trop prélevé sur son capital forestier. Avec près de 800 millions d'habitants, la demande en bois de chauffage est considérable et constitue le facteur de déforestation majeur. En 1982, la demande s'élevait à 133 millions de tonnes de bois alors que la productivité biologique autorisait un prélèvement annuel de 39 millions de tonnes de bois (1). La capacité limite du milieu a été dépassée. La surface forestière est passée de 30 % du territoire indien à 23 %, alors que le maintien de l'écosystème nécessitait un couvert végétal d'au moins 33 % (2).

Le bois est la principale ressource énergétique permettant de satisfaire de nombreux usages dans les communautés rurales. La population indienne est essentiellement rurale (70 % de la population totale). La population rurale dépend des sources d'énergie non commerciales (ou d'énergie traditionnelle : bois, déchets de l'agriculture, déjections animales) à hauteur de 90 % de l'usage total de l'énergie ; elle est de 40 % pour le bois seulement (3). Une pénurie d'énergie fossile pétrole et charbon et aussi de bois comme combustible est à l'origine d'un programme national souhaitant développer des sources alternatives, proposer une meilleure utilisation de la biomasse et réaliser une reforestation (4).

L'Inde a été un pionnier dans la mise en valeur des déchets de l'agriculture en produisant du biogaz au sein de digesteurs anaérobie. Là encore de nombreux besoins sont satisfaits dans les zones rurales grâce à la production de biogaz qui non seulement palie au manque de fuel mais se substitue à lui pour de nombreux usages. Des besoins d'éclairage ou de cuisson dans le secteur domestique mais aussi des besoins d'engrais et de force motrice dans le secteur agricole sont satisfaits essentiellement par le biogaz. L'amélioration des rendements de combustion (5) ainsi que les substitutions inter-énergétiques constituent des solutions susceptibles de réduire la pression sur la ressource forestière des pays en développement.

(1) F. RAMADE, "Les catastrophes écologiques, une menace pour l'avenir de l'humanité", *Futuribles*, Juillet-août 1989, p.73.

(2) DAYAL M., SOOTHA G.D., "Relevance of non-conventional energy sources to the socio economic-situation in India", Conférence mondiale de l'énergie, *Energie, besoins, espoirs*, 1986, p.3.

(3) J. DARMSTADTER, "Energy patterns - in retrospect and prospect", in W.C. CLARK, R.E. MUNN, *Sustainable development of the biosphere*, p.156.

(4) DAYAL M., SOOTHA G.D., opus cité, p.5.

(5) DAYAL M., SOOTHA G.D., opus cité, p.11.

Dans une économie en voie de développement, la population rurale dépendant largement des ressources naturelles pour ses besoins énergétiques, il est nécessaire de réduire les effets irréversibles d'une surexploitation des ressources en bois. En l'an 2000, le déficit en bois pourrait se situer autour de 650 millions de tonnes dans les pays en développement (1). Compte tenu des disparités géographiques, il convient d'ajuster l'offre limitée à la demande croissante dans des pays où la croissance démographique est élevée.

Le Brésil est dans une situation comparable à l'Inde ou à la Chine, à la seule différence que la ressource forestière ne fait pas l'objet d'une préoccupation majeure. La déforestation de la forêt amazonienne s'effectue à un rythme rapide : 80 000 km² brûlés en 1987 et plus de 120 000 km² en 1988 (2). Le déboisement intense libère des surfaces pour l'élevage intensif qui implique l'appauvrissement des sols et empêche le renouvellement du milieu. Cette forêt de 6 millions de km² environ a déjà perdu plus du quart de sa superficie (3). Par ailleurs, 60 % des précipitations qui tombent en Amazonie proviennent de l'évapo-transpiration des arbres ; d'où des risques de bouleversements climatiques importants qui seraient la conséquence de la transformation de la forêt en un désert (4).

Aux côtés de ces différents pays, on observe des situations plus critiques pour des pays où la progression de naissances n'est pas contenue ; d'où des pressions internes sur leur potentiel naturel. Parmi eux, de nombreux pays d'Afrique dans la région sub-saharienne observent des taux de croissance démographiques élevés et le bois de chauffage représente environ 80 % de la consommation totale d'énergie (5).

Dans cette région d'Afrique, la capacité limite des écosystèmes forestiers est largement dépassée (6). Une meilleure utilisation de son potentiel énergétique est nécessaire pour faire face à l'accroissement des besoins ainsi que pour palier au manque d'énergie commerciale permanent.

Nous pouvons tirer des conclusions à partir de l'examen de la situation des différents pays

(1) Conférence mondiale de l'énergie, opus cité, p.367.

(2) F. RAMADE, "Les catastrophes écologiques, une menace pour l'avenir de l'humanité", *Futuribles*, Juillet-août 1989, p.73.

(3) R. DUMONT, "Haïte au massacre", *Science et avenir*, n°78, p.19.

(4) F. RAMADE, opus cité, p.74.

(5) UNIDO, "The role of energy in the industrial development in Africa", Conférence mondiale de l'énergie, *Energie, besoins, espoirs*, 1986, p.20.

(6) Se reporter au tableau de la page 152.

que nous avons abordés :

L'ensemble des pays se caractérise par la prédominance d'une population rurale qui est fortement dépendante des ressources en bois pour la satisfaction des besoins vitaux et des besoins liés à l'activité agricole. La pression exercée sur les écosystèmes forestiers est telle qu'elle dépasse leur productivité biologique en prélevant directement sur le capital. D'où une menace sévère qui peut entraîner des phénomènes irréversibles (érosion, déforestation).

Compte tenu de la croissance rapide des populations et de la lenteur de la transition démographique, une meilleure gestion des ressources en bois combinée avec l'utilisation de ressources renouvelables peut assurer un développement compatible avec les besoins des populations. La substitution des déchets de l'agriculture au bois et l'afforestation doivent permettre la reconstitution du capital forestier. Parallèlement, le développement des activités agricoles et industrielles implique des besoins en ressources fossiles croissants.

Les conséquences au niveau de la biosphère sont : accroissement du CO₂ atmosphérique, déséquilibre des écosystèmes forestiers, modifications climatiques. Alors que les pays occidentaux sont responsables aujourd'hui de plus de la moitié des émissions de CO₂, dans la prochaine décennie, les plus importants contributeurs à l'accroissement de telles émissions seront les pays du tiers-monde (1). D'après des travaux de l'IIASA, on pourrait assister à un doublement des émissions dans les trente prochaines années (2). En augmentant de 2 % par an d'ici 2010, la consommation mondiale d'énergie impliquera une forte augmentation des émissions de CO₂. Ces évolutions sont incompatibles avec la survie de la biosphère.

La poursuite du développement dans les pays du tiers-monde dont la consommation d'énergie primaire va augmenter de 4 % par an exige la mise en oeuvre de stratégies énergétiques augmentant l'efficacité énergétique dans l'utilisation des ressources énergétiques et favorisant la substitution des ressources renouvelables aux ressources fossiles.

Il est fondamental de prendre en compte la productivité biologique des ressources et de respecter ainsi des prélèvements stables correspondant à l'intérêt produit par les écosystèmes. C'est une contrainte environnementale essentielle. Il est clair que l'évolution démographique n'est pas un processus neutre à l'égard des ressources énergétiques et donc intervient

(1) J-C HOURCADE, G. MEGIE, J. THEYS, "Politiques énergétiques et risques climatiques", *Futuribles*, septembre 1989, p.41.

(2) Opus cité, p.51.

plus en aval au sein des équilibres de la biosphère.

Le progrès technique peut palier partiellement au manque d'énergie mais il doit plutôt permettre une disponibilité continue en ressources, véritable garantie d'un développement économique dans un espace limité par le respect des équilibres de la biosphère.

Favoriser la stabilisation de la population peut aider à une meilleure harmonie entre les ressources énergétiques et le maintien des équilibres de la biosphère. Mais cela ne suffit pas. Il est indispensable de favoriser des substitutions inter-énergétiques qui visent à limiter le recours aux énergies fossiles et valorisent plus largement les ressources renouvelables. C'est une condition nécessaire pour satisfaire aux équilibres des écosystèmes. De là à repenser l'économie des systèmes énergétiques futurs, il n'y a qu'un pas.

Le conflit manifeste entre la biosphère et le système énergétique mis en oeuvre dans les pays développés -et suivi dans les pays en développement- exprimé notamment à travers les émissions de CO₂ sera résolu par l'adoption de technologies assurant une économie en ressource et la diversification des sources d'énergie (1). La capacité d'adaptation est différente selon les pays, et son efficacité dépend de la rapidité d'intervention. Au fur et à mesure de l'écoulement du temps, le caractère cumulatif de l'accroissement du CO₂ réduit l'adaptabilité tandis que les incertitudes sur les causes et conséquences de l'effet de serre deviennent des certitudes.

Toute attitude attentiste peut conduire à une rupture dans la logique de développement des sociétés et compromettre l'accession à des niveaux supérieurs pour les moins développées. La maîtrise de la croissance démographique combinée avec celle de l'utilisation des ressources sont deux actions de long terme qui peuvent réconcilier le développement économique avec la survie de la biosphère. Plus tôt elles seront mises en oeuvre et plus vite les altérations nombreuses au sein des écosystèmes pourront être dissipées.

(1) J. THEYS, "Les enjeux économiques des changements globaux", *Economie et humanisme*, n°308, juillet-août 1989, p.58-59.

Conclusion du chapitre 2

L'évolution de la population et plus précisément celle des pays en développement constitue un facteur essentiel dans la relation énergie-biosphère. La mise en oeuvre d'un développement compatible avec la disponibilité en ressources est possible à deux conditions majeures : si les substitutions interénergétiques s'opèrent et si l'efficacité des technologies de transformation des ressources est améliorée.

Dans la mesure où les pays en développement n'atteindront pas la stabilisation de leur population avant la fin du 21^{ème} siècle, il apparaît primordial d'agir efficacement en faveur d'un développement assis sur l'économie des ressources et d'une utilisation non destructrice des ressources renouvelables (le taux d'utilisation doit demeurer inférieur au taux de régénération).

DEUXIEME SOUS-PARTIE :

GESTION INTERTEMPORELLE DES RESSOURCES ENERGETIQUES

"Partie d'un impératif de reproduction qui impliquait celle de toute la biosphère, puis se réduisait aux seules forces du marché, l'économie débouche sur la simple contemplation de ses équilibres internes, abstraction explicitement faite de tout ce qui concerne le vivant. La rupture est totale"

R. PASSET, L'économie et le vivant.

CHAPITRE 3 : L'EVALUATION MONETAIRE DES RESSOURCES ENERGETIQUES : UNE VISION REDUCTRICE DU REEL

Introduction

Dans le cadre des ressources épuisables, le valorimètre monétaire largement employé par l'approche néo-classique ne peut rendre compte correctement de la raréfaction des ressources. Le rôle des stratégies des acteurs exprimé au sein de processus antagonistes de rapports de force va apparaître déterminant dans la formation des prix des ressources fossiles, et notamment dans la formation du prix du pétrole. La conséquence essentielle est que la sphère marchande ne peut contenir à elle seule les moyens d'une gestion temporelle des ressources non renouvelables entre les générations.

L'évacuation de la biosphère qui en découle conduit à l'apparition des effets externes, éléments porteurs de dégradations au sein des écosystèmes. L'environnement naturel en tant que réceptacle de rejets polluants est donc ignoré. C'est l'expression du conflit des logiques de fonctionnement. La procédure d'arbitrage intertemporelle est de plus tronquée par la pratique de l'actualisation -expression du conflit des rythmes temporels- : cette pratique se traduit par la volonté de la sphère économique de se soustraire au rythme de la biosphère. Nous allons ainsi souligner la portée limitée d'une évaluation monétaire dans le cadre d'une gestion intertemporelle des ressources énergétiques.

Section 1 - Formation des prix des ressources

§1 - Approche néo-classique du système de prix

Notre propos ici n'est pas de réaliser un survol de la théorie des prix de l'énergie depuis ses origines avec les réflexions de S. JEVONS (1). Nous nous attacherons à souligner certains points qui nous paraissent essentiels tels le rôle des prix comme indicateurs de l'épuisement des ressources, le rôle de la technologie dans l'allocation optimale des res

(1) Pour approfondir ce sujet, on peut se reporter à :

- P. BARBET, "La théorie des prix de l'énergie dans la pensée économique : une recension", *Economies et sociétés*, série EN, n°1, 1983, p.1809-1834.

- M. ALINHAC, *Actualisation et système de prix en économie énergétique*, CNRS, 1980.

sources et les stratégies des acteurs en tant que processus antagonistes de rapports de force structurant la formation des prix.

Depuis RICARDO, MALTHUS et autres économistes classiques, de nombreuses approches ont été élaborées afin de comprendre les déterminants majeurs des prix des ressources énergétiques (1). Une approche essentielle qui a fait l'objet de nombreux développements est celle de H. HOTELLING (1931). Cette approche s'inscrit dans la pensée néo-classique. Le problème est d'exploiter optimalement un gisement donné de taille connue et de tirer le maximum de profits actualisés sur un horizon temporel fini.

Le programme s'écrit :

$$\text{Max} \int_0^T (P_t Q_t - C_t) e^{-it} dt \quad \text{sous contrainte} \quad X_t = -Q_t$$

Avec P_t : prix de vente de la ressource fossile

Q_t : quantité extraite chaque année

C_t : coût de production global

i : taux d'actualisation. Ici, il est égal au taux d'intérêt

X_t : stock de ressource in situ

Pour HOTELLING, la ressource naturelle n'est pas un facteur de production mais un bien. La ressource est un stock, stock qui diminue avec l'extraction. Les coûts d'extraction ne sont pas pris en compte puisque la ressource est un bien.

La règle d'HOTELLING s'établit ainsi : le prix de la ressource croît avec le taux d'intérêt. P.S DASGUPTA et G.M HEAL ont montré qu'elle constitue un principe fondamental dans la gestion des ressources épuisables (2).

(1) M. ALINHAC, opus cité.

(2) P.S. DASGUPTA, G.M. HEAL, *Economic theory and exhaustible resources*, Cambridge university press, 1979, p.155-159.

On considère un marché concurrentiel. On fait l'hypothèse de l'absence de coût d'extraction. Soit, p_t , le prix de marché de la ressource à la date "t". Soit un individu qui détient p_t unités d'un actif numéraire à la date "t". Il a deux possibilités de "placement" :

- il peut conserver le numéraire, il aura alors $(1 + r_t \cdot \beta)p_t$ unités de numéraire en $(t + \beta)$; $r_t \cdot \beta$ représente le revenu (net de la dépréciation) provenant du bien capital sur la période $(t, t + \beta)$
 - il peut décider d'acheter une unité de stock de ressource en t et la vendre en $(t + \beta)$
- Dans ce cas, il reçoit $P_{t+\beta}$ unités de numéraire en $(t + \beta)$

Dans les conditions de concurrence, il sera indifférent entre ces deux options. La condition d'arbitrage entre les deux périodes s'écrit : $p_{t+\beta} = (1 + r_t \cdot \beta) p_t$

La ressource ne "rapporte rien" tant qu'elle demeure dans le sous-sol. Un stock de ressource in situ n'apporte pas de revenu (dividendes). Quand $\beta \rightarrow 0$, l'équation ci-dessus s'écrit :

$$p(t+1)/p(t) = \dot{p}_t / p_t = r_t$$

En faisant l'hypothèse de coûts d'extraction nuls, le prix de marché d'une ressource épuisable évolue selon cette équation. C'est la règle d'HOTELLING. Cette équation décrit le fait suivant : dans les conditions de concurrence, le taux de rendement du capital apporté par la ressource est égal au taux de rendement gagné en conservant le numéraire. Que l'on achète une unité de stock de ressources en "t" afin de le vendre en $(t + \beta)$, ou que l'on conserve le numéraire en "t", le rendement de l'opération 1 sera équivalent à celui de l'opération 2. L'équation d'arbitrage est une condition d'équilibre de flux pour le marché des ressources épuisables.

Avec le prix de la ressource qui augmente comme le taux d'intérêt ou taux d'actualisation, la valeur du stock (donc le maximum de celle des ventes actualisées) est indépendante de la politique d'extraction actuelle. Les propriétaires du stock de ressources seront indifférents à la marge entre extraire et vendre le flux de ressource d'une part, et le conserver d'autre part.

Sans coûts d'extraction, une unité de ressource in situ est égale à une unité vendue sur le marché.

$$P_t = p_t^R$$

Le prix de vente de la ressource correspond dans ce cas à une royauté ; il correspond à une rente de rareté. (1) C'est le prix d'une unité de ressource in situ. La rente de rareté croît donc à un taux égal au taux d'actualisation.

L'hypothèse de HOTELLING sur l'absence de coûts d'extraction n'est cependant pas très réaliste. Aussi, il convient de préciser les implications de la prise en compte de cette hypothèse.

Considérons les variables suivantes (2)

C, le coût d'extraction de la ressource

R, le rythme ou taux d'extraction

S, taille du stock de ressource

$$C = f(t) \cdot R_t \cdot g(R_t) \cdot G(S_t)$$

p_t , le prix de marché de la ressource in situ

q_t , le prix de marché de la ressource extraite

$$q_t = p_t + \partial C / \partial R_t$$

Le prix de la ressource extraite se décompose en deux : le coût marginal d'extraction et la rente de rareté, et $q_t > \partial C / \partial R_t$. A l'équilibre de concurrence pure et parfaite, le prix comporte une rente de rareté et est donc supérieur au coût marginal d'extraction.

Cela implique que si le stock est grand, une ressource extraite est considérée alors comme une marchandise conventionnelle : le prix est égal au coût marginal d'extraction, c'est à dire que la rente de rareté est faible. La composante "coût d'extraction" domine :

$$q_t = \partial C / \partial R_t$$

Comme le stock diminue, en l'absence de substituts, le fait que la ressource soit épuisable devient primordial. Alors, dans ce cas, le prix de la ressource extraite, devient quasiment égal à la rente de rareté, qui est bien plus considérable que le coût marginal d'extraction.

(1) P. BARBET, L. BENZONI, J-M CHEVALIER, *Economie de l'énergie*, Dalloz, 1986, p.189-191.

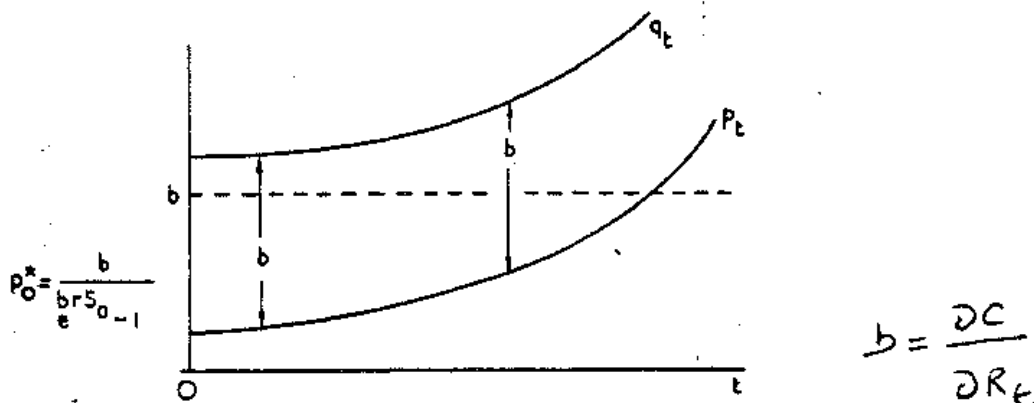
Marshall considère que la royalty couvre le prix de production et le coût de reconstitution du gisement. Voir aussi, P. BARBET, opus cité.

(2) P.S. DASGUPTA, G.M. HEAL, opus cité, p.168-169.

A long terme, on a :

$q_t \sim p_t$, les coûts de production deviennent négligeables dans les prix.

Quand le stock de ressource est grand, p_t augmente exponentiellement au taux r , mais q_t augmente à un taux inférieur à r . Le prix de la ressource extraite augmente à un taux inférieur au taux d'accroissement de la rente de rareté. A long terme, $q_t = p_t$, le prix de marché de la ressource extraite augmente au taux r (voir schéma). Une royauté élevée traduit une conservation de la ressource.



Source : DASGUPTA et HEAL, op.cité, p.171. P_0^* est le prix solution du sentier optimal d'extraction, sentier qui épuise complètement la ressource.

A long terme, les deux prix augmentent au même taux r . Nous ferons ici une remarque.

Selon que la ressource est abondante ou bien au contraire qu'elle s'épuise du fait de l'extraction, le poids des deux composantes du prix change. Dans la mesure où le stock initial représente plusieurs centaines d'années de consommation, le déterminant du prix de la ressource sera le coût marginal d'extraction. Or, n'est-ce-pas la rente de rareté - ou royauté - l'élément qui prend en compte la raréfaction de la ressource ? Sa grande abondance à court terme masquerait ainsi son épuisabilité.

Pourtant, ce n'est pas parce que le stock est grand que la ressource ne se raréfie pas. La rente de rareté devrait être présente. Tout revient à croire que la gestion de la ressource à court terme se résume à la gestion d'une marchandise quelconque ; le stock in situ n'a finalement aucune valeur. En fait, la ressource est considérée comme épuisable dès lors que le stock diminue beaucoup du fait de l'extraction et que l'on se situe dans un horizon de long terme.

Il est donc clair qu'à court terme, tout arbitrage en terme de prix apparaît stérile puisque les prix ne reflètent pas les raretés relatives ni absolues des ressources épuisables. Le

prix, comme signal de l'épuisement et donc de la raréfaction de la ressource n'est pas pertinent. La formation des prix à court terme ne révèle pas le problème de la rareté des ressources.

Une autre limite sévère peut être formulée. Elle concerne la démarche sur laquelle s'appuie la théorie d'Hotelling : l'optimisation de l'exploitation d'un gisement de taille connue à des fins purement lucratives. Les ressources épuisables ne sont donc considérées que sous un angle purement monétaire (recettes actualisées générées par leur extraction) et tout autre considération relative à la sphère non marchande n'est pas étudié.

On a supposé jusqu'ici qu'il n'y avait pas de substituts des ressources épuisables. Cette hypothèse va être remise en question. En effet, dans les prolongements de la théorie d'HOTELLING, se situent les travaux de W.NORDHAUS qui développe une définition particulière de la technologie : "the backstop technology" ou "technologie limite" (1).

Cette technologie permet de résoudre tous les problèmes énergétiques de l'humanité. Elle est ainsi capable de produire des substituts pour les ressources fossiles à des coûts élevés, mais sur une base de ressource inépuisable : la fusion thermonucléaire par exemple. Cette hypothèse garantit donc l'absence de toute pénurie d'énergie. Il envisage ainsi une transition conduisant à une économie basée sur les ressources nucléaires où l'importance économique de la rareté des ressources disparaîtrait.

A backstop technology is "a set of processes that (1) is capable of meeting the demand requirements and (2) has a virtually infinite resource base. The backstop technology may well be extremely expensive relative to current technology ; nevertheless, if it exists, it assures that the planning problem at least has a feasible solution" (2).

La théorie de la "backstop technology" s'appuie sur l'idée développée par Hotelling selon laquelle au fur et à mesure que les ressources sont extraites leurs prix s'élèvent dans le temps, ce qui favorise l'introduction de substituts. Parallèlement, l'élévation des prix impliquent une réduction de la demande et donc une baisse du rythme d'extraction. La dernière tonne extraite va correspondre à un arrêt de la demande. (il y a alors rareté absolue de la ressource). Dans ce contexte, ce sont les hausses de prix résultant de l'épuisement des ressources qui rentabilisent la mise en exploitation de ressources substituables. Les prix des ressources épuisables sont ainsi limités à la hausse par le coût en développement des ressources substituts.

(1) W.D. NORDHAUS, "The allocation of energy resources", *Brookings papers on economic activity*, 1973.

(2) W.D. NORDHAUS, opus cité, p.548.

P.S DASGUPTA et G.M HEAL ont étudié l'incidence de cette technologie sur la politique d'extraction et sur la détermination du prix de la ressource. Ils montrent que la backstop technology est gardée en réserve jusqu'à ce que la ressource soit épuisée, parce que tant que les stocks ne sont pas épuisés, les propriétaires des ressources sont capables de vendre les ressources à un prix plus bas que celui du substitut (1). Ainsi, la backstop technology fournit un prix de marché plafond des ressources naturelles ; elle délimite le prix concurrentiel de la ressource extraite.

Soit b_1 : coût d'extraction d'une ressource épuisable

Soit b_2 : coût de production d'une backstop technology

Soit p_t : prix de la ressource non extraite

Soit q_t : prix de la ressource après extraction

$b_1 < b_2$, le gisement sera exploité pendant la période initiale $(0, T)$; période durant laquelle le produit substitut n'est pas rentable.

Sur la période $(0, T)$, on a : $q_t = b_1 + p^*_0 \exp(rt) < b_2$, $0 \leq t < T$

Si le stock initial (S_0) est très grand, alors q_t a une valeur proche de b_1 (quand $S_0 \rightarrow \infty$)

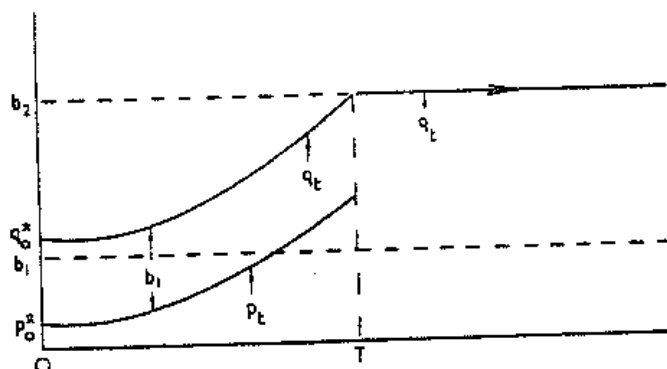
Plus le stock initial est grand, plus le délai d'apparition de la backstop technology est long.

Sur la période $(0, T)$, on a $b_1 < q_t < b_2$. Quand $t \rightarrow T$, $\lim \{b_1 + p^*_0 \exp(rt)\} = b_2$

Le prix de marché de la ressource épuisable est égal au coût de production du produit substitut.

$$b_2 = b_1 + P^*_0 \exp(rt)$$

Selon DASGUPTA et HEAL, à long terme, cette idée est raisonnable compte tenu de l'épuisement de la ressource.



(1) P.S. DASGUPTA, G.M. HEAL, opus cité, p.176-179.

Cependant, tant que la différence de coût entre b_1 et b_2 est importante et tant que le stock est considérable, le prix de la ressource épuisable reste au dessous du coût de production du substitut. A court terme, une égalisation entre le prix de la ressource épuisable et le coût du substitut résulterait d'une attitude de conservation à l'égard de la ressource in situ (1). Nous pouvons remarquer encore une fois que la ressource est considérée comme abondante à court terme et que par conséquent, sa raréfaction n'est pas prise en compte. (domaine du long terme).

Tant que l'on se situe loin de la date d'apparition de la backstop technology, q_t est essentiellement déterminé par b_1 . Mais au fur et à mesure où l'on s'approche de l'épuisement total de la ressource fossile, alors q_t est déterminé par b_2 . Donc, la contrainte d'épuisement n'est véritablement révélée qu'aux abords de la date T , quand la ressource s'est raréfiée. Son prix augmente alors pour s'établir à la valeur de b_2 . A ce moment, la backstop technology se substitue à la ressource épuisée.

Les travaux de NORDHAUS supposent par ailleurs que la backstop technology apparaît en T . Or, si on suppose qu'il y a incertitude sur la date d'apparition, que se passe-t-il ?

P.S DASGUPTA et G.M HEAL ont démontré les implications de cette incertitude à l'égard de la politique d'extraction et de l'évolution des prix (2). Le résultat est le suivant : plus la date d'apparition du substitut est éloignée dans le futur, plus grande est la royauté ou valeur du stock de ressource. L'ensemble des incertitudes relatives à la date d'apparition d'une invention telle une backstop technology, à son coût en développement ne sont pas neutres sur la façon dont la société épuise le stock de ressource.

Dans ce contexte, des ruptures d'approvisionnement énergétique peuvent survenir et les prises de relais entre ressources être compromises. La transition, avec le passage aux ressources substitués, n'est pas assurée par la théorie en présence de telles ruptures. Cela apparaît d'autant plus probable aujourd'hui que le contexte énergétique dans lequel nous sommes présente de sérieuses défaillances (crise du bois de feu et démographie explosive dans les pays en développement, crise de confiance du nucléaire...).

D'autre part, le fondement de la "backstop technology" avec la substituabilité illimitée des

(1) P.S. DASGUPTA, G.M. HEAL, opus cité, p.179.

(2) P.S. DASGUPTA, G.M. HEAL, opus cité, p.180-181 ; p.395-396.

ressources est discutable. L'acceptation de cette hypothèse revient à croire que le capital et la technologie sont des substituts aux ressources naturelles. Une backstop technology repose donc sur l'idée qu'elle peut par nature rendre indépendantes les activités humaines des ressources de l'environnement. C'est une hérésie totale !

Il n'existe pas de substituabilité absolue. Même avec une telle technologie, la fusion thermonucléaire par exemple, il faut recourir aux ressources naturelles (minérales) pour son élaboration et pour son entretien, ressources dont la transformation est assurée par les ressources énergétiques.

Comme le souligne D.W. PEARCE et R.K. TURNER, "They may indeed be backstop technologies that will free us from natural resources, but they cannot be brought into existence by assuming that they are there".(1)

Aussi, dans la mesure où la surexploitation des ressources fossiles n'est pas écartée dans la théorie de Nordhaus, surexploitation générant des gains immédiats pour certains au détriment des autres, la disparition absolue d'une ressource n'est pas impossible. Mais, cette disparition pourrait avoir des répercussions sur le développement des sociétés humaines, et avant même que l'"énergie inépuisable" puisse être maîtrisée.

Pour S. FAUCHEUX, "la théorie de la "back stop technology" conduit à la négation totale de la possibilité pour la croissance ou le développement de se heurter à la rareté absolue d'une source d'énergie fossile". (2)

Mettre en oeuvre une procédure d'exploitation et d'épuisement de la base fossile afin d'aboutir à une source d'énergie abondante comporte un risque de blocage du développement durant la phase de transition. Nous ne pouvons donc accepter une telle approche du système énergétique où l'épuisement absolu d'une ressource est légitimé par l'avènement prochain d'une "ressource inépuisable" capable de répondre aux besoins énergétiques des sociétés.

(1) D.W. PEARCE, R.K. TURNER, *Economics of natural resources and environment*, Harvester Wheatsheaf, 1990, p.50. A ce propos, voir aussi : J. RIFKIN, *Entropy, a new world view*, The Viking Press, 1980, p.78-79.

(2) S. FAUCHEUX, *L'articulation des évaluations monétaire et énergétique en économie*, thèse de doctorat, Université Paris I, avril 1990, p.38.

§ 2 - L'analyse du rapport de force

Une autre approche qui nous paraît intéressante du point de vue de la formation des prix des ressources est celle des rapports de force entre les acteurs. Dans ce cas, la référence au marché pour expliquer les prix laisse la place à la dimension stratégique des ressources.

C'est l'approche notamment de J.M CHEVALIER avec le rôle joué par les coûts de production dans l'établissement de rapports de force entre les différents acteurs de l'industrie pétrolière (1). Le mobile du "combat" est l'appropriation du surplus pétrolier. Il le définit de la manière suivante : "On peut définir le surplus pétrolier comme la différence entre le prix de valorisation d'une tonne de brut, vendue aux consommateurs sous forme de produits raffinés, et le coût moyen total supporté pour extraire, transporter, raffiner et distribuer cette même tonne de brut". (2)

Le surplus se compose d'un ensemble d'éléments agrégés : prélèvements des états producteurs, prélèvements des états consommateurs, prélèvements des compagnies pétrolières sous forme de surprofits.

L'appropriation du surplus par les différents acteurs et donc leurs stratégies vont dépendre de l'évolution des coûts. Les coûts de long terme ont une action structurante sur les acteurs. L'analyse du prix du pétrole brut intègre l'évolution du coût marginal du gisement socialement nécessaire pour satisfaire les besoins mondiaux. Il s'agit donc du coût en développement du dernier gisement. Le coût marginal évolue avec les coûts d'exploration et de production. Quand il est décroissant, le coût de découverte des gisements et les coûts de production diminuent. En tendance, le prix mondial du pétrole s'aligne sur le coût en développement du gisement le plus cher, en coûts croissants et sur celui du gisement le moins cher en coûts décroissants. Dans le dernier cas, la tendance est contrariée par l'absence de concurrence.

Son évolution sur le long terme traduit deux phases distinctes : (3)

- jusqu'en 1970 : c'est la phase des coûts décroissants (de 1859 à 1970). On remarque

(1) J-M CHEVALIER, "Eléments théoriques d'introduction à l'économie du pétrole : l'analyse du rapport de force", *Revue d'économie politique*, mars-avril 1975, n°2, p.230-256.

(2) J-M CHEVALIER, opus cité, page 232.

(3) J-M CHEVALIER, opus cité, p.244 et suivantes.

L. BENZONI, C. LEVEAU, "La formation des prix de l'énergie : essai sur la dynamique du système énergétique", *Economies et sociétés*, série EN, n°1, 1983, p.1877-1878.

une absence de concurrence sur le marché où dominant 8 sociétés pétrolières.

Elles s'approprient la rente minière du Moyen-Orient, les prix mondiaux sont alignés sur les coûts de production les plus élevés. On peut considérer que le marché du pétrole n'existe pas ; il ne fonctionne qu'en 1973. "Jusqu'ici, le prix du pétrole était déterminé par les modalités d'organisation interne des compagnies pétrolières, la stratégie internationale de celles-ci et les rapports de force entre celles-ci, états producteurs et grands états consommateurs". (1)

"Tant que dure cette phase de coût décroissant, le rapport de force devrait jouer normalement (i.e.sil tendances concurrentielles prévalaient) au profit des pays importateurs et au détriment des sociétés pétrolières et des pays producteurs. En réalité, les grandes sociétés pétrolières réussissent, par la cartellisation à imposer leurs conditions, tant aux pays producteurs qu'aux pays consommateurs. Elles accaparent la plus grande partie du surplus. Celui-ci augmente tendanciellement puisque les coûts diminuent et que les prix sont bloqués (au moins jusque vers 1955)" (2). Les prix sont stabilisés par le cartel des sociétés productrices au dessous de 1,8 \$ le baril. La rente "producteur" s'élève à 1 \$ le baril (3).

- depuis 1970, c'est la phase des coûts croissants. Les prix mondiaux augmentent pour que l'exploitation des gisements soit rentable. Le cartel de l'OPEP relève les prix de 2 à 12 \$ le baril. Avec le premier choc pétrolier, c'est les prix moyens du pétrole qui s'alignent sur le coût marginal très élevé (pétrole extrait en Alaska, Mer du Nord ...) des gisements nécessaires pour satisfaire la demande mondiale. La rente s'est accrue au profit des pays producteurs, elle est de nature différentielle (différence entre les coûts) (4).

La mise en production de nouveaux gisements influence à la hausse le coût marginal de longue période. Le prix du pétrole tend à s'aligner sur ce coût marginal qui structure l'industrie pétrolière et le jeu des acteurs dans le partage du surplus pétrolier.

En 1979, le prix du pétrole dépasse 30 \$ le baril. Cette hausse importante du prix n'est cependant pas justifiée par une augmentation des coûts marginaux des gisements socialement nécessaires pour satisfaire la demande mondiale. Ce sont des événements politiques qui sont à l'origine de cette hausse conjonctuelle (guerre Iran / Irak). Conséquence

(1) M. ALINHAC, *Actualisation et système de prix en économie énergétique*, 1980, CNRS, p.108.

(2) J-M CHEVALIER, opus cité, p.246.

(3) P-H BOURRELIER, R. DIETRICH, *Le mobile et la planète*, Economica, 1989, p.138.

(4) Se reporter à P. BARBET, L. BENZONI, J-M CHEVALIER, *Economie de l'énergie*, Dalloz, 1986, p.186.

de ce second choc pétrolier : la production de pétrole mondiale est excédentaire.

Pour maintenir les prix et éviter une chute, le cartel de l'OPEP doit réduire sa production. En 1979, la production de l'OPEP s'élevait à 1553 millions de tonnes ; en 1985, elle s'élève à 840 millions de tonnes. (1)

Une rente de monopole en découle : les prix sont stabilisés à un niveau supérieur au coût de production des gisements marginaux. En 1982, la différence entre le prix d'approvisionnement moyen (17,1 c/th) et le coût marginal de production (12,6 c/th) s'élève à 4,5 c/th : cela constitue une rente perçue par les états producteurs et les sociétés pétrolières. Une rente différentielle est aussi perçue sur les gisements dont les coûts de production sont inférieurs à 12,6 c/th.

Depuis le second choc pétrolier, le prix du pétrole est déconnecté des coûts de production. J.M CHEVALIER écrit : "On estime que le coût de production moyen du pétrole brut au niveau mondial est inférieur à 8 dollars, pour un prix de 30 dollars. IL y a donc ainsi un surplus pétrolier d'environ 420 milliards de dollars que se partagent les pays producteurs et les compagnies". (2)

La détermination des prix du pétrole est en réalité un processus complexe, qui, depuis 1979, met en oeuvre le jeu des acteurs des pays exportateurs (OPEP, non OPEP), l'évolution du coût marginal de longue période ainsi que les tendances du marché (rôle du prix spot). Le prix du pétrole s'apparente à un prix de compromis qui révèle ces différents éléments. (3)

L'OPEP exerce sur le marché mondial une fonction régulatrice avec la mise en oeuvre du système des quotas de production. En 1987-88, le cartel parvient à maintenir le prix autour d'une fourchette relativement stable : entre 15 et 18 dollars le baril. (4) Les prix du pétrole sont donc déterminés par les stratégies des acteurs in fine. Le partage du surplus pétrolier conditionné par l'évolution des coûts de production se réalise entre des acteurs aux intérêts divergents. Souhaiter une stabilisation des prix du pétrole brut dans un tel contexte

(1) - P-H BOURRELIER, R. DIETHRICH, opus cité, p.561.

- L. BENZONI, C. LEVEAU, "La formation des prix de l'énergie : essai sur la dynamique du système énergétique", *Economies et sociétés*, série EN, n°1, 1983, p.1878.

(2) J-M CHEVALIER, "Les prix de l'énergie au futur", *Economies et sociétés*, série EN, n°1, 1983, p.2098.

(3) J-M CHEVALIER, L. BENZONI, P. BARBET, opus cité, p.278-281.

(4) P-H BOURRELIER, R. DIETHRICH, opus cité, p.139.

n'est pas facile à mettre en oeuvre. Une stabilisation à un niveau de prix élevé engendrerait une redistribution des rentes au sein des acteurs. (1)

L'OPEP ne constitue pas un cartel homogène. On peut distinguer trois tendances parmi les treize membres de l'organisation, tendances qui traduisent des intérêts stratégiques divergents en matière de prix. Il y a d'un côté les pays fortement peuplés mais dont les réserves de pétrole sont faibles (Algérie, Nigéria, Gabon, Equateur, Indonésie). Le ratio réserves/production est donc faible ce qui implique une préférence pour le présent très forte et la volonté de maximiser les revenus de court terme en recherchant une hausse des prix. D'un autre côté, figurent les pays dotés d'un ratio réserves/production élevé et peu peuplés (Arabie Saoudite, Koweït, Emirats Arabes Unis). Au sein de ce groupe, les intérêts convergent vers une modération des prix afin de conforter l'avenir de leurs richesses pétrolières à long terme. Entre ces deux groupes, un troisième est constitué par des pays peuplés et dotés de réserves importantes (Irak, Iran, Vénézuéla), et des pays faiblement peuplés dont les réserves sont peu importantes (Libie). (2)

Jusqu'ici, l'OPEP conserve cependant une certaine cohésion grâce au rôle "fédérateur" de l'Arabie Saoudite. Les événements de la guerre du Golfe ont montré que l'organisation pouvait maintenir son pouvoir de régulation sur le marché grâce à son aptitude à compenser rapidement des déficits conjoncturels de production (rôle des capacités de production excédentaires de l'Arabie Saoudite notamment), d'où une stabilité relative des prix.

Finalement, depuis 1986, date de la "guerre des prix" engagée par l'Arabie Saoudite, l'OPEP exerce, au delà de désaccords ponctuels, un rôle de régulateur sur le marché mondial. Il faut cependant noter qu'aux côtés des stratégies des pays de l'OPEP, d'autres intérêts relevant des "non OPEP" (pays producteurs et compagnies pétrolières) démontrent leur rôle de plus en plus prépondérant dans la détermination du prix du pétrole brut. Ces acteurs exercent un pouvoir structurant, qui "dérange" la fixation officielle des prix déterminée par l'OPEP, sur un marché libre : le marché spot.

Ce marché au comptant tend à devenir le marché directeur du brut et donc tend à imposer ses mécanismes de régulation. Son développement depuis le premier choc pétrolier témoigne de la volonté des pays producteurs non OPEP d'augmenter leur part dans

(1) P-N GIRAUD, "Les cercles vertueux du pétrole", *Le Monde*, 25.06.91, p.23.

(2) D'après : V. MAURUS, J-P TUQUOI, "L'OPEP", *Le Monde*, 18.02.92, p.37.

- J. PERCEBOIS, *Economie de l'énergie*, Economica, 1989, p.447-450.

ment, le marché spot qui ne représentait avant 1974 moins de 2% des transactions représentée environ 70% en 1986. (1).

Le marché spot constitue aussi un moyen de pression efficace sur les prix pour les compagnies pétrolières : en effet, en maintenant des prix bas, elles destabilisent l'OPEP dans sa politique de contrôle des prix du brut. Comme le marché tend à être excédentaire, les prix spot s'établissent en dessous des prix officiels du brut et conduisent ainsi les pays de l'OPEP à choisir une stratégie de baisse des prix destinée à maintenir les parts de marché, et aussi une stratégie de réduction de leur production destinée à maîtriser la baisse des prix. Selon J. PERCEBOIS, la logique de fixation du prix du pétrole brut serait alors la suivante : le prix spot des produits pétroliers détermine par ricochet le prix du brut sur le marché libre, et celui-ci détermine à son tour le prix officiel du brut fixé par l'OPEP. (2)

Les modes de formation des prix expriment donc des stratégies d'acteurs (pays producteurs, compagnies pétrolières) souhaitant maintenir leur pouvoir économique sur le marché.

L'évolution des prix n'est donc pas la résultante d'une confrontation de l'offre et la demande sur un marché concurrentiel. L'analyse des rapports de force traduit les stratégies mises en oeuvre par les unités actives (pays producteurs et compagnies pétrolières) et par les unités passives (pays consommateurs) et leur rôle dans la détermination des prix des ressources. Les fluctuations de prix de court terme dépendent des stratégies des acteurs sur le marché. La signification du prix est alors un compromis entre des agents plus ou moins puissants : il devient l'expression d'un rapport de force.

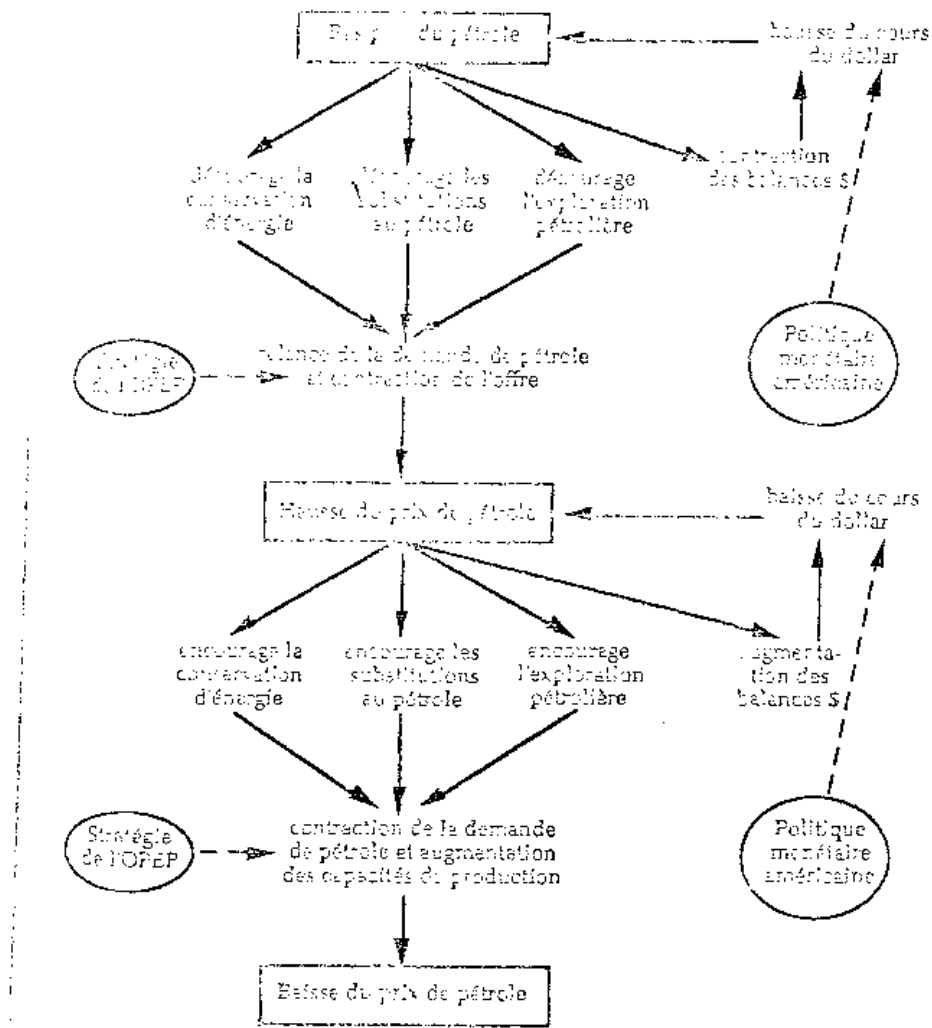
Par ailleurs, deux autres facteurs interviennent dans la régulation du marché pétrolier : la politique monétaire américaine et le dollar. Les fluctuations du dollar influencent les mécanismes de formation des prix du pétrole : en tendance, prix du pétrole et cours du dollar semblent varier en sens contraire. Des interdépendances existent entre prix du brut, cours du dollar et politique monétaire. La politique monétaire américaine engagée fin 1986, en favorisant la baisse du cours du dollar (politique de "dévaluation compétitive") s'est accompagnée d'une stratégie de l'OPEP visant à rétablir sur le marché des prix plus rémunérateurs.

J. PERCEBOIS met ainsi en évidence l'existence d'un "cycle du porc" associé au pétrole.

(1) J. PERCEBOIS, opus cité, p.483.

(2) J. PERCEBOIS, opus cité, p.452. Il s'agit de la logique du "net-back". La valeur net-back d'un brut donné est égale à la moyenne pondérée des prix spot des divers produits pétroliers que ce brut permettra d'obtenir au raffinage. Pour comprendre la détermination de cette valeur, se reporter aux pages 484-486.

"Du cycle du porc" appliqué au pétrole



Compte tenu des facteurs de nature stratégique et financière qui interviennent dans le fonctionnement du marché pétrolier, et en particulier dans la détermination des prix, il apparaît difficile de considérer les prix comme des signaux de la raréfaction de la ressource.

Comment dans ces conditions peut-on considérer que les prix dont le reflet de la raréfaction des ressources ? Manifestement, ils ne prennent pas en compte l'épuisement progressif des ressources puisque ils sont essentiellement la résultante de conflits d'appropriation du surplus généré par les ressources.

Une gestion à long terme des ressources énergétiques ne peut être menée correctement si elle contient des processus décisionnels excluant l'épuisement des ressources. Les calculs

menés au niveau micro-économique par les compagnies pétrolières ne portent que sur le court terme et sur la maximisation de leurs surprofits. (1)

Dans ce contexte, la volonté de préserver les ressources fossiles au profit des générations à venir est évidemment absente. Les décisions prises à court terme négligent la finitude des ressources accessibles. Nous aborderons dans la section suivante, les limites du système de prix à long terme et nous montrerons les difficultés posées par les mécanismes de l'actualisation dans la gestion des ressources énergétiques. Cela nous amènera à reconsidérer la relation énergie-biosphère et donc à intégrer le système énergétique au sein de la biosphère dans une approche de long terme.

(1) J-M CHEVALIER, "Eléments théoriques d'introduction à l'économie du pétrole : l'analyse du rapport de force", *Revue d'économie politique*, mars-avril 1975, p.250.

Section 2 - Economie et biosphère : le conflit des rythmes et des logiques

§ 1 - L'actualisation : les limites d'une procédure inadaptée

L'échelle de temps est particulièrement longue lorsqu'on s'intéresse aux ressources énergétiques. En effet, de l'extraction de la ressource jusqu'à la livraison d'énergie au consommateur final, plusieurs années se sont écoulées (d'autant plus qu'il faut prendre en compte les délais de mises au point des technologies d'extraction et de transformation, ainsi que la prospection des ressources).

M. ALINHAC considère que l'échelle de temps du système énergétique est de l'ordre de plusieurs dizaines d'années (recherche, production et consommation) (1). Il est donc clair que toute décision relative aux ressources énergétiques va s'intégrer dans un horizon temporel de plusieurs décennies. Ainsi, afin de réaliser des arbitrages entre les différentes dates, entre présent et futur, une procédure très couramment utilisée est celle de l'actualisation.

Présentons la procédure dans le cadre d'une approche micro-économique. Considérons un investissement initial I_0 qui entraîne, pour chaque année t ($t = 1, n$) des dépenses d'exploitation D_t ainsi que des recettes R_t . L'intérêt du projet sera apprécié en fonction du bénéfice actualisé.

Celui-ci se définit :

$$B = -I_0 + \sum_{t=1}^n \frac{R_t - D_t}{(1+t)^n}$$

t est appelé le taux d'actualisation

Le taux t^* tel que $B = 0$ est appelé taux de rentabilité du projet.

(1) M. ALINHAC, *Actualisation et système de prix en économie énergétique*, CNRS, 1980, p.56.

$\frac{1}{(1+t)^n}$ est appelé le facteur d'actualisation

Plus l'intervalle de temps est grand, et plus le facteur d'actualisation est élevé.

Plus $\frac{1}{(1+t)^n}$ est élevé, et plus le poids accordé à l'investissement initial sera grand.

Un résultat important en découle : plus le facteur d'actualisation est élevé et plus les décisions proches de la date présente ont de l'importance tandis que les événements qui apparaîtront dans un futur éloigné n'auront qu'un faible poids.

L'actualisation est une procédure qui déprécie l'avenir par rapport au présent. Comme l'indique M. ALINHAC, cela est préjudiciable au secteur énergétique, secteur très capitalistique, où les investissements s'inscrivent dans une échelle de temps longue. (1) Un taux d'actualisation élevé va accorder plus de poids aux questions présentes et un taux plus faible insistera davantage sur les questions futures. Un taux élevé va donc favoriser l'exploitation rapide des ressources afin d'obtenir un profit immédiat, en laissant de côté les avantages à long terme. L'implication de la procédure de l'actualisation est donc la recherche de l'activité qui va avoir le maximum de rendement dans un minimum de temps.

"Si un baleinier peut réaliser un profit annuel de 15 % en exterminant les baleines en dix ans, puis investir cet argent dans une autre activité, quel intérêt verra-t-il à se contenter d'un bénéfice de 10 % pour préserver cette ressource". (2) H.DALY et R.J.A GOODLAND proposent ainsi de retenir un taux d'actualisation nul afin de préserver l'environnement.

Concernant l'économie des matières premières, la règle de gestion optimale est la suivante : maximiser le profit total actualisé en respectant les contraintes relatives aux stocks de chaque ressource.

T. de MONTBRIAL a ainsi développé un modèle simple où le producteur de la matière première établit un échéancier de production lui permettant de maximiser son profit total actualisé. (3) Il considère qu'une matière première est disponible dans n "gisements" différents, en quantités respectives Q_1, Q_2, \dots, Q_n . Le coût d'extraction au comptant d'une unité

(1) M. ALINHAC, opus cité, p.57-60.

(2) H. DALY, R.J.A. GOODLAND, "Les instruments requis", in C. MUNGALL, D.J. MCLAREN, *La terre en péril*, presses de l'université d'Ottawa, 1990, p.301.

(3) T. DE MONTBRIAL, *Le désordre économique mondial*, Calmann-Lévy, 1974, p.54-56.

dans chaque gisement est constant, soit respectivement a_1, a_2, \dots, a_n . Les sources sont rangées par ordre de coûts croissants, $a_1 < a_2 \dots < a_n$

L'horizon économique est de T périodes, $t = 1, 2, \dots, T$

L'auteur suppose que le système de prix intertemporel relatif à la matière première est déterminé par une procédure de planification. Cela est d'un intérêt capital. En effet, "si les prix sont fixés par une "bonne" procédure de planification, le problème de la rareté de la matière première ne peut pas se poser, puisque la structure des prix doit être telle que la demande s'annule lorsque l'offre s'évanouit par épuisement de la ressource". (1) Le seul moyen d'allouer optimalement la ressource est donc l'intervention d'un planificateur qui, ayant connaissance des stocks de ressources et des demandes présente et future, serait en mesure de déterminer le système de prix pour toutes les périodes de l'horizon temporel fini, système assurant que les ressources ne soient pas épuisées, tant que l'espèce humaine existe !

Admettons cette hypothèse peu réaliste. Le facteur d'actualisation à la date est noté β_t .

β_t est lié au taux d'intérêt μ supposé constant par la relation : $\beta_t = \frac{1}{(1 + \mu)^{t-1}}$

Soit P_t , le prix actualisé à la date 1 d'une unité extraite à la date t (après déduction du prix de la matière première non extraite). Le prix au comptant correspondant à la date t est noté π_t .

D'où la relation : $p_t = \beta_t \cdot \pi_t$

La règle optimale de gestion consiste à résoudre le programme suivant :

$$\text{Max } (p_1 - a_1) q_{11} + (p_2 - \beta_2 a_1) q_{12} + \dots + (p_T - \beta_T a_1) q_{1T} + \dots$$

$$+ \dots + (p_1 - a_n) q_{n1} + (p_2 - \beta_2 a_n) q_{n2} + \dots + (p_T - \beta_T a_n) q_{nT}$$

$$\text{sous contraintes : } q_{11} + q_{12} + \dots + q_{1T} \leq Q_1$$

$$q_{n1} + q_{n2} + \dots + q_{nT} \leq Q_n$$

(1) T. DE MONTBRIAL, opus cité, p.55.

On est amené à maximiser le profit actualisé pour la production de chaque gisement pris séparément. Si on considère le ième gisement, l'expression $(p_t - \beta_t a_i)$ représente le profit actualisé à la date 1 de la vente d'une unité de la source i à la date t . Le gisement doit alors être exploité aux périodes pour lesquelles $(p_t - \beta_t a_i)$ est le plus élevé. Tout va dépendre en fait du facteur d'actualisation.

Quand $t \rightarrow 1$, $\beta_t = 1 / (1 + \mu)$ est élevé.

Quand $t \rightarrow \infty$, $\beta_t \rightarrow 0$.

Le profit actualisé sera plus grand quand $\frac{1}{(1 + \mu)^{t-1}}$

est élevé et donc quand on se situe proche du présent.

Par contre, quand on s'approche de la date d'épuisement de la matière première, période T , on se situe dans un futur éloigné et donc le poids du profit actualisé est très faible. Les premiers gisements exploités seront ceux dont les profits actualisés sont les plus élevés et donc se situent proches de $t = 1$; cela correspond d'ailleurs à ceux dont les coûts d'extraction sont les plus faibles. Le profit unitaire au comptant pendant la période d'exploitation croît de manière géométrique. On a : $\pi_t = a_i + h_i (1 + \mu)^{t-1}$ où h_i représente la valeur maximum du profit actualisé.

La pratique de l'actualisation efface ainsi le futur et finalement ignore les conséquences à long terme des décisions prises dans le présent. Ainsi, le poids des décisions prises dans le présent par les générations actuelles est-il plus élevé que celui des décisions prises par des générations futures.

Comment dès lors allouer de manière optimale les ressources énergétiques entre des générations appartenant à différentes périodes ? Dans la mesure où ce sont les générations présentes qui ont le plus de poids dans les décisions, comment s'assurer que les générations à venir pourront disposer de suffisamment de ressources ?

Considérant que la demande future est une inconnue, toute allocation optimale à partir du marché est vouée à l'échec. Les générations à venir sont exclues du marché du fait même qu'elles ne peuvent y être présentes. Nous ne pensons pas que l'actualisation soit une bonne procédure pour parvenir à un arbitrage satisfaisant dans un contexte où des générations successives ne sont jamais présentes au même moment sur le marché. Comment apprécier l'utilité de consommateurs inexistantes, par quel moyen connaître leur fonction de

satisfaction aux prochains millénaires ?

Une autre étude, menée par J. DESROUSSEAUX, va nous démontrer que l'usage du taux d'actualisation peut conduire à la dilapidation des ressources minières. (1) L'auteur considère l'exploitation d'un gisement de houille. Son modèle consiste à minimiser le coût total actualisé pour une profondeur du gisement donnée et pour une durée d'exploitation donnée. La gestion optimale d'une mine conduit au résultat suivant : à chaque date, le coût marginal est inférieur au prix de vente. Seule l'année de l'arrêt de l'exploitation, le coût marginal est égal au coût moyen et à la valorisation de la ressource.

L'auteur suppose que les réserves sont calculées en retenant les tonnages exploitables en dessous d'un coût marginal égal au prix de vente, choisi stable. L'exploitation optimale conduit à extraire en tout T tonnes. La politique de gestion optimale se traduit alors par un "écrémage" ; il y a donc une perte de réserves. Quand la gestion optimale donne intérêt à exploiter jusqu'à un coût marginal inférieur au prix de vente, il en résulte une exploitation abusive des réserves ; cela d'autant plus que le taux d'intérêt est positif. Le taux d'écèlement est très sensible au taux d'intérêt, ce qui conduit l'auteur à s'interroger sur le bien fondé de la méthode de l'actualisation en présence de ressources limitées. Dans le cas de telles ressources, la meilleure politique régulatrice est celle pour laquelle le taux d'intérêt est nul. (2)

Reprenons son modèle.

Soit un problème de long terme : l'ouverture des mines sur une longue période. Les mines fournissent un bien B, l'autre bien produit dans l'économie est K. Le revenu réel "S" de l'économie est une combinaison de ces deux biens :

$$\frac{\partial S}{S} = \beta \left[\frac{\partial B}{B} + k \frac{\partial K}{K} \right], \quad \beta(1+k) = 1 \quad (1)$$

Il existe N mines dans l'économie ; le rythme d'ouverture $n(t)$ ou nombre gisement mis en exploitation vérifie la relation :

(1) J. DESROUSSEAUX, *L'évolution économique et le comportement industriel*, Dunod, 1966.

(2) J. DESROUSSEAUX, opus cité, p.380.

∞

$$\int_0^{\infty} n(t) dt = N$$

0

Hypothèse : l'optimum instantané des satisfactions est obtenu quand les mines vendent au coût marginal. Soit y , la production d'une mine et le coût de cette production : $by + hy^2$

La production B est égale à : $n.y$

Elle va être vendue au prix $V = b + 2h.y$

La production K s'écrit : $K = R_w - (by + hy^2) n$

L'optimum des satisfactions instantanées s'écrit :

$$k.VB = K = R_w - n(by + hy^2) \quad (2)$$

$$\text{soit : } n(y) = \frac{R_w}{y [(k+1).b + (2k+1)hy]}$$

n et y varient en sens contraire.

La satisfaction S varie comme :

$$S = (ny)^\beta [R_w - n(by + hy^2)]^{\beta k} = \frac{R_w (kb + 2khy)^{\beta k}}{(k+1)b + (2k+1)hy} \quad (3)$$

Comme $\beta(k+1) = 1$, il montre que S décroît quand y augmente et que n augmente. Il existe donc un intérêt à "écrémer à mort" et à épuiser rapidement les mines. Ce résultat s'explique par l'existence de rentes minières. La rente se définit par la relation suivante :

$$V_y - by - hy^2 \quad (4)$$

A l'optimum, $V = b + 2hy$. D'où la rente devient égale à hy^2 .

L'optimum des rentes actualisées s'écrit :

$hy^2.e^{-it} = \text{constante} = c$, i est le taux d'intérêt et e^{-it} est le coefficient d'actualisation.

Si le taux d'intérêt est constant, on a la relation suivante :

$$y = \sqrt{\frac{c}{h}} \cdot e^{it/2} \quad (5)$$

J. DESROUSSEAUX précise que cette valeur y est plafonnée (les ressources sont limitées) à la valeur y_0 . y croît de $\sqrt{c/h}$ à y_0 . Puis, il y a arrêt de l'exploitation en t_n et la satisfaction devient nulle.

c est d'autant plus petit que i est élevé. A la limite, pour $i = 0$, on aura $y = y_0$ et n croîtra comme R_w . La durée t_n , où toute exploitation s'arrête et où la satisfaction devient nulle, durée qui augmente quand i diminue, sera alors maximale. Pour $i < 0$, les mines ne seraient plus exploitées.

Ainsi, si le taux d'intérêt est élevé, les satisfactions immédiates sont élevées, puis diminuent rapidement pour atteindre le niveau qui correspond à l'exploitation totale des derniers gisements ($y = y_0$: maximum technique). Après, la satisfaction est nulle. Le moment où cet événement se produit est d'autant plus éloigné que le taux d'intérêt est plus bas.

L'arbitrage entre présent et futur en terme de calculs actualisés peut aller à l'encontre d'une préservation des ressources pour les générations futures. "On est ainsi conduit à penser qu'un Etat conscient de l'effet du taux d'intérêt devrait le fixer à un niveau nul dans le secteur minier. Mais c'est là une vue théorique, car quelle que soit l'égalité des rentes actualisées offertes par les exploitations, la majorité des propriétaires préférera les toucher tout de suite (sécurité à l'égard des aléas). Si même il n'en était pas ainsi, on ne voit pas quelle régulation amènerait le nombre voulu de mines à s'ouvrir à chaque époque, si chacun prenait ses décisions en considération des seuls prix de marché supposés donnés. Il faut jusqu'à 10 ans pour mettre une mine en oeuvre et il est évident que les "prix de marché" résultant des décisions acquises des concurrents ne peuvent pas guider l'un des intéressés, puisqu'elles ne se manifestent que très longtemps après". (1)

Un moyen à mettre en oeuvre consisterait à faire appel à un organisme destiné à planifier de manière centralisée l'ouverture des mines dans le temps avec soit une fixation des

(1) J. DESROUSSEAUX, opus cité, p.380.

quantités à produire, soit avec l'interdiction d'écrémer les réserves. L'effet majeur de l'actualisation tel qu'il nous est révélé aujourd'hui est donc bien un "retrécissement" de l'horizon temporel qui résulte de l'effacement du futur éloigné. Aussi, cette procédure ne prend non seulement en compte le champ temporel au sein duquel se manifestent les impacts des décisions prises mais aussi elle est incapable d'intégrer les rythmes de la biosphère.

Nous pouvons citer ici encore J. DESROUSSEAUX à propos des ressources naturelles : "L'exploitation d'un gisement prive définitivement l'humanité d'une ressource qui ne se renouvelle pas (ou du moins bien moins vite qu'on ne l'exploite)". (1)

L'exploitation des ressources fossiles révèle avec un décalage dans le temps ses effets sur les équilibres de la biosphère. De tels effets ne sont pas évalués dans les politiques d'extraction des ressources des acteurs. L'évolution des rejets de CO₂ atmosphérique imputables aux ressources fossiles traduit une rupture des rythmes temporels : alors que les calculs de rentabilité des projets relatifs aux énergies épuisables se sont succédés sur un horizon très court à l'échelle de la biosphère, les effets de l'exploitation de ces énergies ont dépassé l'horizon temporel retenu par les décideurs et donc n'ont pas été considérés par les mécanismes de l'actualisation.

Le conflit des rythmes économique et écologique est présenté par R.PASSET comme une rupture dangereuse opérée par le système économique : "il n'y a aucune commune mesure entre l'horizon prévisionnel des hommes et le champ temporel des phénomènes que transforment leurs activités". (2)

Dans un autre domaine, J.S MAIRI analyse les échelles de temps qui régissent l'évolution de l'atmosphère et la croissance des forêts. Le sort des forêts sur la planète dépend de l'interaction de trois sous-systèmes : l'atmosphère, les forêts et les activités humaines. Alors que le changement de l'atmosphère s'effectue sur des siècles, la durée des investissements dans le secteur forestier se calcule en décennies. (3)

Par ailleurs, il est de plus en plus probable que la contrainte environnementale joue plus fort que celle relative à la raréfaction à court terme des ressources fossiles dans le développement des sociétés.

(1) J. DESROUSSEAUX, opus cité, p.365.

(2) R. PASSET, *L'économie et le vivant*, 1979, Payot, p.77.

(3) J.S. MAINI, "La forêt : baromètre de l'environnement et de l'économie", in C. MUNGALL, D.J. MCLAREN, *La terre en péril*, presses de l'université d'Ottawa, 1990, p.184-205.

Dans ces conditions, il devient urgent de trouver les moyens conceptuels d'intégrer dans les calculs économiques le champ de la biosphère dans sa totalité compte tenu de la complexité et de l'étendue des impacts du système énergétique sur l'écosphère.

Dès lors, le signal de marché que constitue le prix ne peut être retenu pour interpréter les mécanismes agissant au niveau de la sphère économique et au niveau de la biosphère. Les pouvoirs du marché, élément réductif, sont limités : ils ne peuvent signaler la raréfaction des ressources correctement, l'effet de leur exploitation sur l'environnement ou encore permettre une gestion des ressources entre les générations.

§ 2 - Logique marchande contre logique non-marchande

La problématique trouve son origine dans l'incapacité d'intégrer dans le calcul économique les éléments permanents de la biosphère que constituent l'air, l'eau, la faune ou encore la flore et les écosystèmes. Le calcul économique ne fait référence qu'aux seules valeurs marchandes. Tous les phénomènes non monétarisables sont évacués de facto. L'ensemble des ressources renouvelables, essentielles pour l'homme, est accessible pour les activités économiques sans qu'aucun échange marchand n'ait lieu. La conséquence est qu'aucun indicateur de valeur économique n'est perceptible et que finalement, leur prix - comprenons leur valeur - est nul. La valeur de la nature n'a pas de prix, et pourtant son prix est nul ... paradoxal non ?

Ce paradoxe met l'accent sur la dualité du concept de valeur tel que le conçoit l'économie de marché et tel que le conçoit l'écologie.

Dans le premier cas, la valeur est synonyme de prix non nul. Le prix est considéré comme un signal, un indicateur de la rareté relative compte tenu d'une offre et d'une demande ; il permet un ajustement entre demande et offre. Dans le second cas, la valeur intègre une dimension plus large qui prend en compte les relations entre le vivant et l'inanimé, les lois de la matière et de l'énergie. Le patrimoine naturel a une valeur intrinsèque qui n'est pas "extériorisée" : elle obéit aux lois de la thermodynamique, seul valorimètre des éléments appartenant à la biosphère. (1)

Le marché est donc fondamental pour l'évaluation des ressources en économie. C'est ainsi que les ressources hors marché, dont la valeur d'échange est nulle, sont considérés comme des biens "libres" ou encore des biens "gratuits". Cependant que dire de leur utilité, sinon qu'elle est infinie !

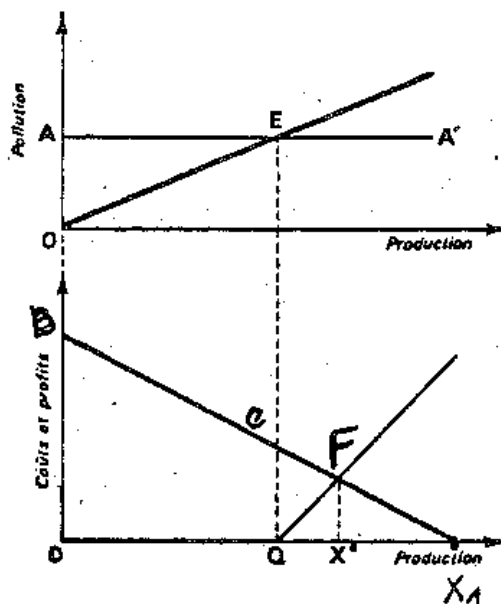
Pourtant, retenir uniquement les éléments qui ont un prix peut compromettre la reproduction et la survie des éléments dépourvus de prix. L'activité d'extraction-transformation des ressources énergétiques a des effets sur la biosphère : les rejets de CO₂ notamment qui perturbent l'équilibre atmosphérique de la biosphère. Pourtant, dans le calcul économique de tels effets ne sont pas évalués ; il n'y a pas d'indicateur de valeur.

D.W PEARCE a étudié les relations qui existent entre l'optimum économique et l'optimum écologique. Ses travaux sont repris par J.P BARDE et E. GERELLI qui montrent l'incompa-

(1) Se reporter au chapitre 5 "Fondements et principes de la thermodynamique".

tibilité des deux optimums. (1) Tout d'abord, ils montrent que "le calcul économique peut conduire à un niveau d'activité supérieur à celui qui serait compatible avec le maintien d'un équilibre écologique".

D'après BARDE, GERELLI, op.cité, p.120



Le niveau d'activité OX^* - tel que le détermine le calcul économique - est supérieur au niveau "écologique" OQ . Q représente (projection de E) le point à partir duquel la capacité d'assimilation du milieu est dépassée. C'est un plafond en écologie. En X^* , le milieu ne peut plus se régénérer ; l'optimum économique, ou optimum de PARETO, correspond à un niveau de production supérieur à celui qui correspond au maximum de pollution supportable par le milieu.

De plus, "d'une période à l'autre, au fur et à mesure que la production augmente, le stock de pollution accumulé dans l'environnement s'accroît et plus le stock de pollution non assimilée augmente, plus la capacité d'assimilation du milieu diminue". (2) Ils démontrent ainsi qu'une activité polluante se condamne à terme car seul un niveau de production nul peut assurer un équilibre écologique. Il y a en réalité conflit entre optimum économique et équilibre écologique.

L'optimum économique correspond à l'objectif de maximisation immédiate de l'avantage social net (surface $OQFB$). Par contre, l'optimum écologique s'inscrit dans le long terme et

(1) J-P BARDE, E. GERELLI, *Economie et politique de l'environnement*, PUF, 1977, p.119-121.

(2) opus cité, p.123.

se maintient tant que la capacité d'assimilation n'est pas dépassée. L'avantage collectif à long terme consiste à minimiser les risques écologiques et donc à maintenir la production à un niveau OQ. Dans ce cas, la collectivité subit une perte de profit net (surface QFC). On retrouve le conflit des rythmes ici. Pour les auteurs, cette incompatibilité est accentuée par la procédure de l'actualisation qui efface les effets futurs très lointains des activités économiques présentes sur l'environnement.

R. PASSET a longuement analysé les dangers de l'"économisme réductionniste" à l'égard de la reproduction du milieu naturel. Il conclut sévèrement : "la nature se moque de l'optimum dit de Pareto". (1) La logique de marché ne garantit pas la pérennité du milieu naturel car toutes les conséquences d'une pollution sont difficiles à appréhender et donc le niveau optimal d'activité peut dépasser la capacité d'assimilation du milieu. La non prise en compte des irréversibilités, des effets de seuils (franchissement d'un point critique mettant en danger la survie de l'écosystème), des effets d'amplification (concentration d'un produit émis en fin de chaîne alimentaire) et des effets de synergie (combinaison d'effluents générant un produit nocif) au sein d'un écosystème se traduit par une accumulation de rejets que peut menacer l'équilibre à long terme de l'écosystème (exemple de l'eutrophisation de certains lacs, de la concentration de DDT le long des chaînes alimentaires ...). La logique de marché peut donc compromettre à long terme les équilibres écologiques par le déversement de rejets et exercer une menace sur la survie des espèces. (2)

Comme la logique de marché ignore celle de la biosphère, elle menace la pérennité des ressources dont la reproduction ne peut plus être assurée. Des crises écologiques comportant des pollutions, des ruptures de cycles et des épuisements de ressources sont ainsi apparues au fil des décennies sans que la logique de marché ne s'en inquiète, un bien libre étant hors de son champ d'analyse par définition. Les imperfections des mécanismes du marché ont été révélés par l'apparition de déchets conjointement à l'expansion des activités énergétiques (il s'agit notamment des produits de la combustion).

R.U. AYRES considère que les prix des ressources minérales non renouvelables sont sous-évalués car ils ne tiennent pas compte du coût ultérieur de l'élimination des déchets, déchets qui affectent directement l'environnement. (3)

La production de déchets n'est pas prise en compte par la sphère marchande puisque un

(1) R. PASSET, *L'économique et le vivant*, Payot, 1979, p.224.

(2) OCDE, *Indicateurs d'environnement*, 1991, p.40-41.

(3) R.U. AYRES, "Le métabolisme industriel et les changements de l'environnement planétaire", *Revue internationale des sciences sociales*, août 1989, n°121, p.403-405.

déchets n'est pas affecté d'un prix. Pourtant, les matériaux ne disparaissent pas après utilisation mais se transforment en déchets et donc demeurent dans l'environnement en le dégradant. Les prix de marché ne prennent pas en compte les coûts sociaux de production et de consommation des ressources énergétiques.

R.U AYRES écrit : "Ne pas inclure les préjudices sociaux et environnementaux dans les coûts a entraîné une surutilisation des matières premières en général, et , ce qui est pire, une surexploitation des ressources vierges non renouvelables."

L'idée essentielle qui est d'ailleurs le point de départ de nombreuses analyses, est que le marché ne peut fonctionner correctement. Le problème posé par l'apparition de pollutions et de déchets du fait des activités énergétiques révèle l'existence d'externalités négatives. Le concept d'externalité négative ou de déséconomie externe permet de repérer un problème d'environnement dont l'existence empêche le marché de parvenir à un optimum de PARETO. J.E MEADE donne la définition suivante : "an external economy (deseconomy) is an event which confers an appreciable benefit (inflicts an appreciable damage) on some person or persons who were not fully consenting parties in reaching the decision or decisions which led directly or indirectly to the event in question". (1)

Un effet externe est la conséquence d'une décision d'un individu qui va affecter l'utilité d'autres individus sans qu'aucune transaction sur le marché n'ait lieu. Dans le cas d'une unité polluante, les rejets sont considérés comme des effets externes négatifs dus à l'activité de production, effets qui sont imposés à la collectivité dont le bien être social est réduit. Les dommages provoqués par la pollution ne sont donc pas directement pris en compte par le marché.

L'externalité peut être appréhendée comme l'écart entre le coût social de l'activité d'une entreprise et son coût privé. Quand l'entreprise ne prend pas en compte le coût social (pour l'ensemble de la collectivité) induit par la pollution, l'effet externe existe et l'entreprise maximise son profit à un certain niveau de production. Pour parvenir à l'optimum de PARETO, le seul moyen est l'internalisation de l'effet externe. L'entreprise modifie son comportement et intègre dans son calcul économique la pollution engendrée par son activité ; une évaluation monétaire de l'effet externe est alors nécessaire.

Dans ce cas, l'optimum collectif peut être défini. Le niveau de production qui maximise le bien être collectif sera alors inférieur à celui qui maximise le profit de l'entreprise. (2)

(1) J.E. MEADE, *The theory of economic externalities*, Institut universitaire de Hautes Etudes Internationales, 1973, p.15.

(2) J-P BARDE, E. GERELLI, opus cité, p.83.

L'application du principe de l'internalisation des externalités négatives dans les faits s'est traduite par l'adoption du principe pollueur payeur (PPP) à la fin de l'année 1974 par les pays de l'OCDE. Dans un récent rapport, l'OCDE souligne qu'"il convient d'étudier plus avant les moyens d'étendre le PPP à des problèmes de pollutions mondiaux tels que le changement climatique. Indépendamment de l'évolution du PPP à l'avenir, il ne fait aucun doute que l'intégration des coûts de l'utilisation des ressources d'environnement dans les mécanismes économiques de formation des prix ne soit une étape importante en vue de s'assurer que ces ressources soient mieux gérées pour les générations futures." (1)

Il est clair que les mécanismes de détermination des prix que nous connaissons aujourd'hui sont imparfaits et ne permettent pas de rendre compte des effets des activités de production sur la biosphère, ni de gérer efficacement les ressources naturelles afin de les préserver pour les années futures.

Aussi, il convient de rappeler que l'outil d'aide à la décision qu'est l'analyse coûts-avantages constitue une limite essentielle à l'approche globale intégrant la biosphère. Cette méthode d'évaluation consiste à affecter une valeur monétaire aux avantages des politiques (cela correspond aux coûts des pollutions évitées) et à comparer les avantages avec les coûts de mise en oeuvre de telles politiques. L'arbitrage s'effectue en comparant avantage marginal et coût marginal des différents politiques.

S. FAUCHEUX démontre que cette méthode est inadaptée dans le cadre d'une pollution globale : la valeur de la somme qu'un utilisateur serait prêt à payer pour cautionner le déséquilibre de la biosphère provoqué par l'accroissement de l'effet de serre est incommensurable puisqu'elle est infinie. (2)

Le valorimètre monétaire ne peut être un bon outil d'évaluation de l'avantage d'une politique, avantage représenté par le coût évité de la pollution. Cette limite condamne l'utilisation de l'analyse/coût-avantage en tant que moyen de définition d'une politique de lutte contre les pollutions globales. Concernant les coûts relatifs à la mise en oeuvre des politiques de contrôle des pollutions globales, leur évaluation dépend de la nature de la politique mise en oeuvre. Selon que la politique de contrôle est une politique passive, d'adaptation ou de prévention, les coûts de mise en oeuvre varient mais l'évaluation ne pose pas de problème majeur. Une difficulté cependant apparaît dans le cas où une réglementation relative à l'accroissement de l'effet de serre est mise en oeuvre (réglementation visant à li-

(1) OCDE, *L'état de l'environnement*, 1991, p.276.

(2) S. FAUCHEUX, "Le coût des pollutions globales", *Economie et humanisme*, n°308, juillet-août 1989, p.63.

miter les consommations d'énergie fossile). En effet, dans cette hypothèse, tous les secteurs économiques mais aussi l'ensemble des pays du globe sont concernés par la réglementation et par les effets de la pollution.

S. FAUCHEUX écrit : "la redistribution qui en résultera se fera au détriment des pays les plus pauvres dont le développement risque d'être retardé, voire annihilé, si une réglementation stipule la réduction de leur consommation d'énergie fossile." (1)

Enfin, l'analyse coût-avantage se heurte à un décalage temporel entre le moment où le coût et les conséquences de la pollution sont repérables et le moment où la politique destinée à éliminer la pollution se met en place. Le coût d'une politique adaptative qui intervient à court terme et celui d'une politique préventive qui intervient à long terme sont difficilement comparables ; la première politique va avoir des effets immédiats tandis que l'autre verra ses effets se prolonger au delà de l'horizon prévisionnel de l'économie (dont le maximum est 30 ans) et permettre un rééquilibrage au sein des cycles biogéochimiques sur un temps indéfiniment long à l'échelle humaine. La pratique de l'actualisation, compte tenu des implications mentionnées au paragraphe précédent, n'apporte pas une solution satisfaisante. En sous-évaluant les avantages attendus des politiques de contrôle par rapport à leurs coûts, on est conduit à adopter une position passive ou à appliquer une réglementation insuffisante et donc à ne pas agir efficacement sur les pollutions. (2)

Le marché ne peut donc à lui seul assurer la reproduction du milieu naturel, et éviter de graves crises écologiques. Il peut exister, au delà de l'horizon temporel économique, des pénuries. Le développement économique des pays industrialisés s'est effectué sur la base des seules ressources fossiles dont les prix étaient sous-estimés car ne retenant pas les coûts sociaux associés aux processus d'extraction-transformation. La non-compensation de ces coûts s'est traduite par une responsabilité croissante du système énergétique dans les pollutions globales et une consommation éffrénée de combustibles fossiles participant à leur raréfaction absolue ; les stocks naturels (non marchands) diminuent constamment.

"Because energy producers have not been required to abate pollution, or to internalize the external diseconomies of their actions or to pay prices fully reflecting the rapid use of non-renewable resources, the results have been quite predictable. The world has been engaging in an orgy of excessive energy production and consumption. Un realistic prices for

(1) S. FAUCHEUX, opus cité, p.65.

(2) S. FAUCHEUX, J-F NOEL, opus cité, p.94.

energy have encouraged over production, wasteful use, and energy growth rates which cannot be supported by dwindling reserves." (1)

Comme le précise J.M CUMBERLAND, dans le domaine des ressources énergétiques, aucun producteur ou consommateur ne prend en compte les effets externes négatifs qui disparaissent de la sphère marchande tandis qu'ils ressurgissent dans la sphère physique réelle où loge le système économique. Pourtant, les déchets et rejets issus des activités énergétiques constituent des dommages pour la biosphère dont le coût peut se révéler supérieur à celui de l'extraction des ressources. L'intégration de coûts environnementaux impayés dans le calcul économique, coûts affectés à l'utilisation et au recyclage des déchets, se traduirait par une économie en ressource dont le rythme d'extraction serait ralenti ; ce qui permettrait de faire face à la demande future, grande inconnue porteuse d'incertitudes.

Cependant, nous avons pu observer que la limite imposée par la logique marchande comportait en elle les germes de la destruction des éléments permanents de la biosphère. Par conséquent, la relation énergie-biosphère ne peut être réduite à des valuations monétaires sous prétexte que la sphère économique est la seule en droit d'imposer ses contraintes. Au contraire, en reconsidérant la place du calcul économique et le rôle des prix dans les économies de marché, il faut intégrer l'étude des ressources énergétiques dans la biosphère, dimension englobante. Une politique visant à limiter les effets des ressources fossiles sur la biosphère et s'attachant à les préserver dans un horizon infini, doit être recherchée.

Transmettre le patrimoine énergétique au fur et à mesure de la succession des générations dans le temps prend alors toute sa portée dès que le principe de conservation, principe naturel, en est l'éclaireur. L'objet du chapitre suivant sera d'étudier ce principe et de montrer qu'il peut conduire à une meilleure allocation des ressources entre les générations.

(1) J.H. CUMBERLAND, "Energy, environment and social science research priorities", in OCDE, *Energie et environnement, méthodes d'analyse des relations à long terme*, 1974, p.13.

Conclusion du chapitre 3

Les limites de l'évaluation monétaire autorise une nouvelle approche des ressources énergétiques, approche qui doit s'inscrire dans un cadre d'analyse global intégrant la sphère marchande et la sphère non marchande. Autrement dit, les différentes composantes du patrimoine énergétique doivent être gérées de telle façon que la diversité du patrimoine énergétique soit préservée tout en autorisant des transferts intergénérationnels compatibles avec l'environnement naturel.

La transmission des ressources énergétiques ne doit donc plus être révélée par le système des prix mais par un système de valeurs non marchandes qu'il conviendra de définir.

CHAPITRE 4 : LE PRINCIPE DE CONSERVATION

Introduction

Au coeur de la régulation des ressources énergétiques entre les générations successives réside le problème de la compatibilité des choix intergénérationnels. Les décisions énergétiques structurent fortement le patrimoine énergétique dans le temps et sont à l'origine d'un recours excessif aux ressources non renouvelables. Pourtant, il existe une voie différente qu'un principe essentiel peut dessiner : c'est le principe de conservation. Ce principe permet d'assurer la satisfaction des besoins présents sans compromettre les besoins futurs en s'appuyant, dans un contexte porteur d'incertitudes et en information croissante, sur la flexibilité des choix en présence. Ce principe a par ailleurs été à l'origine du développement de la théorie de la valeur d'option.

L'intérêt de la conservation d'espaces naturels pour les périodes futures -exprimé au sein de la valeur d'option- révèle une stratégie opportune de décision caractérisée par une forte flexibilité. Cette valeur est ainsi un critère efficace dans la prise de décision en présence de choix antagonistes. Cependant, son évaluation met en évidence les limites de son emploi.

Section 1 - Satisfaction des besoins présents et économie des ressources énergétiques

§1 - Le principe de conservation : un principe éthique

Ce principe appliqué aux ressources énergétiques a pour objectif d'assurer leur pérennité en les protégeant de prélèvements abusifs et de participer ainsi à la permanence du patrimoine énergétique. La notion de patrimoine est ici particulière : elle est basée sur des relations d'interdépendance entre les générations successives, relations exprimées par des décisions séquentielles adoptées en présence d'incertitude. Le patrimoine énergétique n'est donc pas figé : il se modifie dans le temps sous l'effet des décisions successives. Il existe là une irréversibilité décisionnelle très forte.

Il en résulte le fait suivant : la préservation des ressources a une incidence sur l'allocation des ressources entre les générations présentes et à venir et ne peut être dissociée d'une allocation intertemporelle. Le principe de conservation constitue un principe plus éthique qu'économique. Les limites de sa légitimité résident dans les valeurs attachées à la préservation des ressources par les générations présentes. Des comportements illégitimes ne sont pas exclus : un sacrifice des générations présentes au profit des générations à venir ou la destruction irréversible par les générations présentes de ressources non renouvelables. Dans ce dernier cas, il y a un refus délibéré de gérer les ressources de manière à les transmettre aux générations futures. (1)

La difficulté majeure de l'application d'un tel principe réside dans le problème de la transmission aux générations futures des ressources énergétiques, générations absentes, et dans les attributs conférés à ces générations. Par attributs, il faut entendre les choix énergétiques effectués par les générations présentes, choix liés à des usages spécifiques et choix non neutres à l'égard de la biosphère. Dans un monde caractérisé par la prééminence des ressources fossiles d'où émergent de néfastes effets sur les équilibres de la biosphère, comment les générations présentes peuvent-elles assurer la pérennité du patrimoine énergétique et transmettre aux générations à venir un capital physique et biologique qui leur assure un nécessaire développement ?

En toute équité, il conviendrait de renoncer rapidement aux ressources qui s'épuisent de manière irréversible et de recourir aux ressources renouvelables, seules capables de se perpétuer sans altérer la biosphère.

Dans un contexte de déséquilibres au sein de la biosphère, poursuivre le développement des sociétés sur la base des ressources fossiles c'est nier le principe de conservation. Le principe de conservation doit assurer dans un contexte d'épuisement des ressources fossiles et d'accumulation des rejets issus de leur transformation-utilisation, trois fonctions essentielles :

- la préservation du patrimoine énergétique
- la diminution des rejets issus des activités énergétiques
- la transmission des ressources aux générations futures.

La première fonction s'applique aux ressources énergétiques fossiles et aux ressources renouvelables. Pour les premières, compte tenu de la finitude des stocks, leur exploitation entraîne une diminution absolue du stock dans le temps, diminution fonction du taux d'utili-

(1) O. GODARD, "Environnement, modes de coordination et systèmes de légitimité : analyse de la catégorie de patrimoine naturel", *Revue économique*, mars 1990, vol.41, n°2, p.238-239.

sation des ressources. Leur durabilité est inversement proportionnelle à leur vitesse d'utilisation. Leur exploitation ne permet donc pas d'assurer leur pérennité. Elles sont irréversiblement détruites.

Concernant les ressources renouvelables, leur caractère de flux les préserve "naturellement" de toute dilapidation humaine. Une remarque s'impose cependant. On peut considérer que certaines ressources renouvelables sont sujettes à une disparition possible dans la mesure où les prélèvements opérés diminuent la disponibilité absolue des ressources - la biomasse ou la géothermie en constituent deux exemples.

Dès que le taux de prélèvement dépasse le taux de régénération ou reconstitution de la ressource, alors elle peut progressivement disparaître. Il s'agit là de ressources autorégénérables où le taux de renouvellement n'est pas constant. Le renouvellement est dépendant du taux d'utilisation. Pour éviter cet écueil, une solution consiste à fixer des seuils à ne pas dépasser. D.W PEARCE propose de contingenter les ressources afin d'éviter que le stock-exemple de la déforestation- ne tombe en dessous du "seuil minimum de reconstitution". (1)

Le contingentement, en évitant des taux d'utilisation excessifs, permet d'assurer une meilleure gestion des ressources. Ainsi, à long terme, il faut s'assurer que le taux d'utilisation des ressources demeure inférieur à leur taux de régénération.

Nous ferons l'hypothèse que la conservation du patrimoine énergétique, si elle n'exclut pas d'imposer des limites pour certaines ressources renouvelables, reste essentiellement tournée vers une diminution de l'utilisation des ressources fossiles et parallèlement une réhabilitation de la composante renouvelable. Les choix énergétiques de long terme doivent tenir compte du principe de conservation et substituer pour de nombreux usages les ressources renouvelables aux ressources fossiles ; ils doivent également assurer le recyclage des déchets solides engendrés par les utilisations passées des ressources fossiles (produits de la combustion).

La seconde fonction ne peut être assurée que si la première est remplie. En effet, les rejets issus des activités énergétiques accumulés dans la biosphère incombent aux seules ressources fossiles et donc leur diminution absolue nécessite la diminution du taux d'utilisation. Cette fonction permet le rétablissement des équilibres de la biosphère et génère un développement harmonieux du système énergétique compatible avec la totalité englo-

(1) D.W. PEARCE, "La gestion des ressources naturelles renouvelables et les incitations économiques", in *Resources naturelles renouvelables*, 1989, OCDE, p.26.

bante. Elle intègre les contraintes imposées par la biosphère. A long terme, le flux de déchets doit être inférieur à la capacité d'assimilation de l'environnement.

Enfin, le principe de conservation est totalement constitué quand la fonction troisième est à son tour assurée. Celle-ci ne peut être vérifiée que si les deux fonctions précédentes l'ont été. Elle suppose que les ressources transmises aux générations futures sont compatibles avec les choix des générations présentes (souci d'équité intergénérationnelle) ; cela implique que les générations présentes n'ont pas dilapidé ou conservé excessivement les ressources et qu'elles ont limité leurs effets néfastes sur la biosphère. Dans ces conditions, le développement des générations présentes ne peut pas compromettre celui des générations à venir.

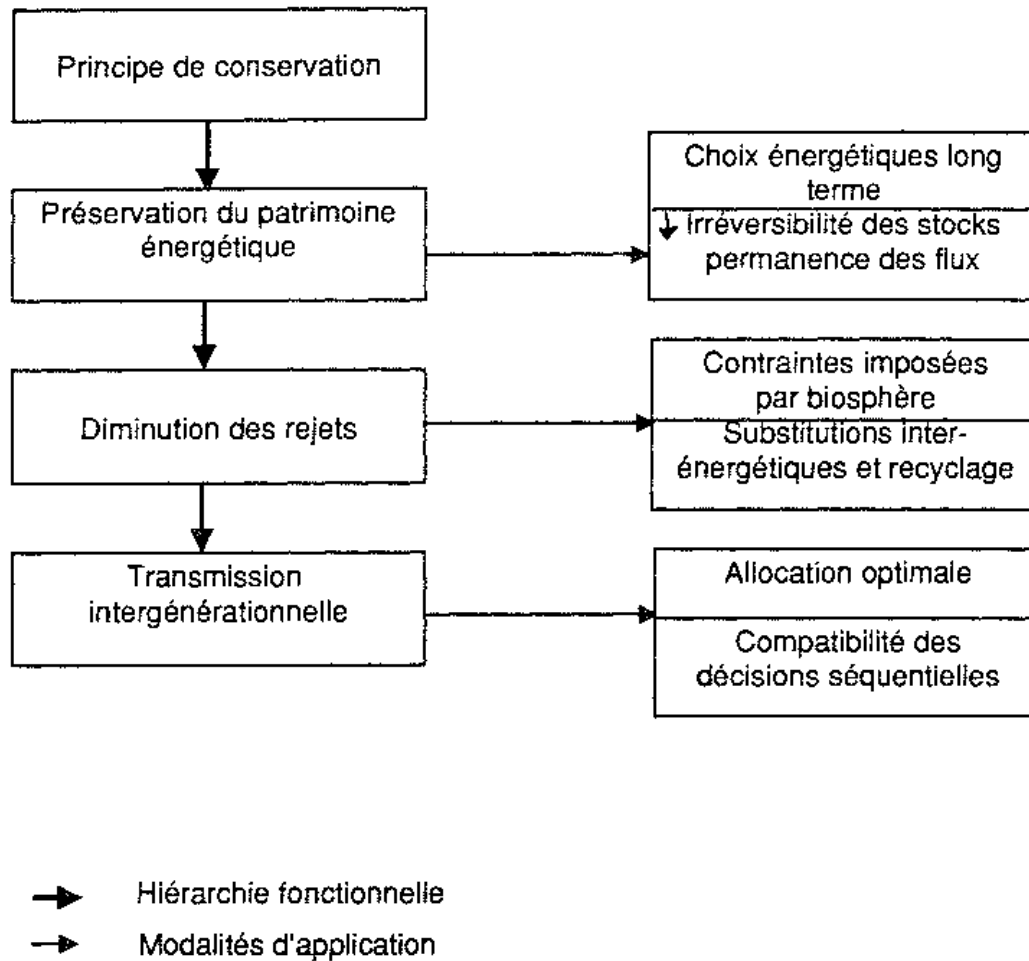
Compte tenu de l'évolution de la population mondiale, des pressions exercées sur les ressources fossiles pour satisfaire les besoins énergétiques, de l'accumulation de CO₂ atmosphérique, le principe de conservation apparaît comme une nécessité imminente.

Une propriété essentielle de ce principe est qu'il intervient sur une échelle de temps suffisamment longue pour accorder aux générations éloignées de nous, une place légitime. Alors que l'approche marchande ne pouvait tenir compte de pénurie au delà d'un horizon temporel tronqué et que la pratique de l'actualisation dépréciait les périodes futures, l'adoption du principe de conservation, sans pour autant déprécier le présent, englobe un ensemble de décisions séquentielles relatives à des choix énergétiques intertemporels où s'expriment le passé, le présent et le futur.

L'irréversibilité temporelle des choix relie les générations successives dans un mouvement de concert puisque la conservation est leur valeur commune.

La relation énergie - biosphère dans le cadre de l'application du principe de conservation doit assurer alors une allocation intertemporelle des ressources énergétiques efficace.

Nous pouvons résumer ainsi :



Le patrimoine énergétique s'apparente donc à un bien commun sur lequel portent des choix successifs dont chacun a pour objectif d'assurer sa préservation quantitative et qualitative, choix tels qu'ils ne compromettent pas ceux des générations futures. Le concept de préservation est donc un élément essentiel pour la transmission des ressources. J.V KRUTILLA l'a considéré dans une analyse des ressources naturelles originale. (1)

Dans la mesure où la qualité de l'environnement se détériore, une conservation des ressources pour les usages des générations futures peut se révéler démodée par le progrès technique.(2) Aussi, il préfère prendre en compte le fait suivant : les ressources naturelles, dotées de valeurs non signalées par le marché, peuvent fournir des aménités pour les générations présentes et futures.

(1) J.V. KRUTILLA, "Conservation reconsidered", *The american economic review*, vol.LVII, n°4, september 1967, p.778.

(2) A ce propos, nous verrons dans le chapitre suivant que le progrès technique n'est pas illimité et donc que la préservation des ressources énergétiques est nécessaire.

Des aménités sont des agréments tels que les activités récréatives, culturelles, de loisir, de recherche. Les ressources sont dans ce cas utilisées directement par le consommateur ; elles font l'objet d'une consommation directe.

L'utilisation d'un espace à des fins culturelles ou récréatives est compatible avec la préservation de l'environnement naturel (exemple d'un parc naturel). Ainsi, "les phénomènes de nature" peuvent faire l'objet d'une consommation directe ou d'une consommation indirecte (en tant que facteur de production, ils interviennent dans la fabrication de produits manufacturés).

P. POINT définit cette classe de ressources naturelles comme étant dotée des propriétés suivantes : (1)

- ces ressources peuvent être objet d'allocation entre des usages multiples
- pour une ressource donnée, il existe un large éventail d'allocations possibles (des allocations compatibles entre elles à celles qui ne le sont pas)
- ce sont des ressources dépourvues de substitut étroit relativement à leur consommation directe
- la reproduction de "phénomènes de nature" est irréalisable techniquement
- quand ces mesures sont allouées à la consommation directe, le champ de leurs possibilités d'utilisations alternatives est maximal.

Il apparaît au vue de ces propriétés, que l'arbitrage entre la consommation directe et la consommation indirecte de "phénomènes de nature" est un problème fondamental.

Prenons l'exemple de la construction d'une centrale nucléaire. Sa construction a pour effet de priver définitivement un site qui aurait pu être affecté à des activités d'agrément. Son exploitation génère une pollution thermique au sein de la rivière près de laquelle elle est installée ; pollution qui n'est pas sans effet sur l'équilibre écologique du milieu halieutique. Son exploitation s'accompagne d'une production de déchets qui font l'objet d'un stockage irréversible dans l'environnement.

Nous pouvons noter l'incompatibilité parmi ces différentes fonctions : la fonction production est incompatible avec la fonction écologique (respect des équilibres). La fonction stockage est elle aussi incompatible avec la fonction écologique : il y a une accumulation de déchets que l'environnement n'absorbe pas. Il existe une irréversibilité intrinsèque à toute utilisation

(1) P. POINT, "Allocation de ressources naturelles et phénomène d'irréversibilité", *Economies et sociétés*, série F, n°25, septembre 1973, p.1620.

des ressources à des fins de consommation indirecte. En effet, le choix d'une consommation indirecte des phénomènes de nature (ici l'espace où est localisé la centrale et le cours d'eau utilisé pour le refroidissement) est irréversible. On ne peut revenir à l'état initial, antérieur à la décision de construire la centrale. Par contre, l'utilisation du site à des fins de consommation directe (fonction écologique, reproduction d'espèces, ...) est un choix non irréversible : d'autres utilisations sont toujours possibles.

Ainsi, le choix d'une allocation particulière à moment donné conditionne donc implicitement ceux qui pourront être effectués dans les périodes à venir. Dès lors, l'extension rapide et démesurée du parc des centrales en France constitue t-elle un choix approprié si on se situe dans une perspective de long terme ? (1)

Cette prolifération outrancière non seulement hypothèque le choix des générations à venir mais aussi condamne des espaces en des zones irréversiblement dénaturées. Quelle légitimité peut-on conférer à un tel choix ?

Si le développement de l'énergie d'origine nucléaire s'accompagne de perturbations locales au sein des écosystèmes, le développement de ressources telles le pétrole ou le charbon implique des répercussions au niveau des cycles biogéochimiques et donc affecte au niveau global la biosphère.(2)

Nous pensons que parmi les services directement consommables que nous livrent les ressources naturelles, figurent aux côtés des aménités, les fonctions régulatrices assurées au sein des cycles biogéochimiques ou services vitaux. Ce sont selon P. POINT, des services naturels finals qui sont quasiment vitaux, indispensables pour la survie de la biosphère. (3) Par exemple, il s'agit du maintien de la composition chimique de l'air, le filtrage des UV, rôle des ressources naturelles dans la stabilité des cycles biogéochimiques ...

L'existence de mécanismes de nature écologique permet le maintien des équilibres nécessaires au développement de la vie terrestre.

Dès lors, que l'on prenne en compte les aménités ou les services vitaux, il s'agit dans les

(1) Le parc électronucléaire français est surdimensionné. Des erreurs de prévisions (la loi du doublement tous les dix ans de la consommation d'électricité est erronée) conduisent à une surcapacité estimée à 1000 MW en 1990. Source : P. RADANNE et L. PUISEUX, *L'énergie dans l'économie*, Syros, 1989, p.126-127.

(2) Il faut cependant noter que l'énergie nucléaire peut affecter au niveau global la biosphère dès que l'on considère les accidents tels en 1986 Tchernobyl.

(3) P POINT, "Eléments pour une approche économique du patrimoine naturel", *Comptes du patrimoine naturel*, INSEE, C 137-138, p.455.

deux cas de prendre en compte l'environnement d'un point de vue purement qualitatif. La disparition d'un site naturel ou l'altération d'une fonction biogéochimique (perturbation de la composition en CO₂ atmosphérique) conduit à une diminution irréversible de la qualité de l'environnement.

Un choix énergétique prenant acte de l'irréversibilité liée à une consommation indirecte d'une ressource naturelle, doit être tel qu'il préserve la qualité de l'environnement, économise la base de ressources non renouvelable sans compromettre les choix futurs.

Une question se pose alors : est-ce-que l'économie des ressources fossiles peut réduire le niveau de satisfaction des générations présentes ?

Deux raisons essentielles révèlent que la diminution du recours aux ressources fossiles n'implique pas celle du bien être des générations actuelles. Tout d'abord, la satisfaction des besoins énergétiques doit se faire sur la base de substitution inter-énergétiques avec le développement absolu de la composante renouvelable et sur l'amélioration des performances énergétiques des convertisseurs (efficacité énergétique). L'ensemble des besoins énergétiques est donc satisfait. De plus, ces deux moyens d'actions autorisent simultanément une réduction des rejets et donc une perturbation moins importante des équilibres de la biosphère. Une diminution du bien-être est exclue si nous faisons l'hypothèse que les services vitaux figurent dans la fonction d'utilité des individus. Si l'amélioration de la qualité de l'environnement est un argument implicite de la fonction d'utilité, la baisse de la teneur en CO₂ atmosphérique ou le rétablissement de sites dégagés de rejets destinés au recyclage contribueront inévitablement à une amélioration du bien-être.

Le respect des équilibres biogéochimiques pour les générations présentes peut préserver dans le cadre du principe de conservation l'environnement présent et futur sans diminuer leur bien-être.

Toute la difficulté réside dans l'arbitrage consommation directe-consommation indirecte, arbitrage qui façonne les futurs possibles. P. POINT a étudié comment le choix de l'affectation d'un "phénomène de nature", soit à une consommation directe (source de service naturel final) soit à une consommation indirecte (facteur de production d'artefacts) influence les choix à venir. (1)

Il considère tout d'abord les conséquences des effets de la technologie. A la suite de KRUTILLA, il reprend l'asymétrie du progrès technique : tandis qu'il affecte la production de biens manufacturés, il n'affecte pas celle de services naturels finals. Le progrès technique

(1) P POINT, Economies et sociétés, opus cité.

permet d'augmenter la production d'énergie mais ne peut ni reconstituer "un phénomène de nature", ni augmenter les services produits. Par ailleurs, l'utilisation de "phénomène de nature" à des fins de consommation indirecte en réduit le stock. Cette action est irréversible. Une quantité de ressource allouée à la production d'un bien manufacturé en t , n'est plus utilisable à des fins de consommation directe en $t + 1$.

Dans son modèle, il va prendre en compte ces deux effets (asymétrie et irréversibilité). Il considère une ressource naturelle R existant en quantité limitée. Ce stock est voué à deux utilisations :

- à des fins de consommation directe,
- à des fins de consommation indirecte.

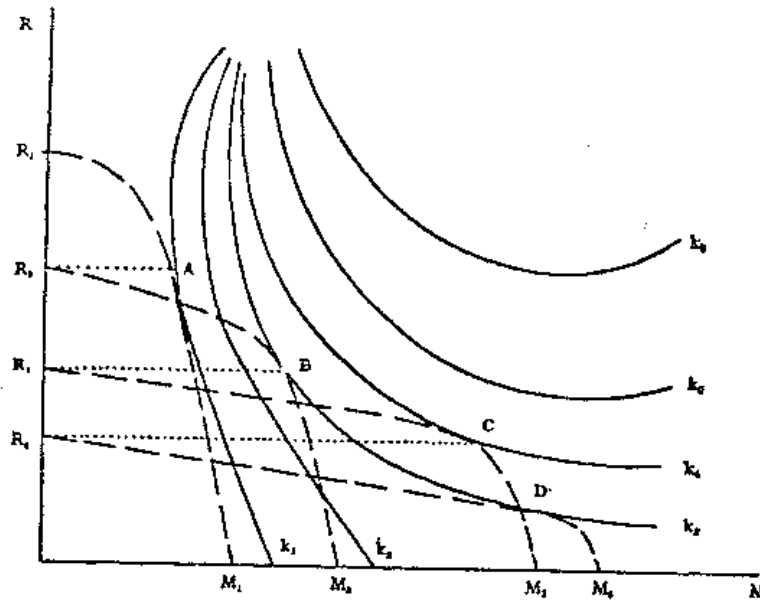
R est utilisée pour produire des biens manufacturés ($M = f(R)$). La consommation directe est supposée ne pas altérer le stock de ressource. Les générations successives accordent plus d'importance pour utiliser la ressource comme services naturels finals (courbes d'indifférence $k_1, k_2, k_3, k_4, k_5, k_6$).

On représente la courbe de transformation de la ressource en considérant l'effet d'asymétrie et l'effet d'irréversibilité (courbes en pointillés). Les points de contacts entre les deux courbes traduisent les choix optimaux pour la collectivité à chaque période.

Nous remarquons que l'utilisation de la ressource pour la production de biens manufacturés permet de passer sur des courbes de satisfactions plus élevées pendant un certain temps seulement (si le taux de progrès technique est élevé). En effet, du fait des irréversibilités affectant la ressource, on ne peut accéder à des niveaux de satisfaction supérieurs ; il y a même régression.

Sur la figure : en $t = 2,3$, la communauté avait atteint des niveaux de satisfaction plus élevés (k_3, k_4) en sacrifiant successivement les quantités ($OR_1 - OR_2$) et ($OR_2 - OR_3$) de ressource naturelle.

en $t = 4$, il y a régression : la communauté ne peut atteindre que k_3 .



La réduction du stock de "phénomènes de nature", actifs naturels irremplaçables, peut être donc préjudiciable pour les générations futures. Les conséquences d'un choix à moment donné, si ce choix est irréversible, vont réduire les choix futurs. Afin de garder ouvert le champ des choix pour les générations à venir, on est amené à prendre les décisions les moins irréversibles.

En matière de choix énergétiques, cela conduit à préserver les "phénomènes de nature", à économiser les ressources fossiles tout en satisfaisant les besoins présents. L'usage dont font l'objet les ressources énergétiques est un critère de choix fondamental qui doit guider vers une utilisation parcimonieuse des ressources fossiles et vers des substitutions inter-énergétiques. Le principe de conservation contribue à assurer une ouverture sur les choix futurs et conduit à reculer plus avant les frontières de l'irréversibilité.

§ 2 - Préservation, irréversibilité et incertitude

Dans le paragraphe précédent, nous avons montré combien les décisions, les choix d'une génération influent sur l'éventail des possibilités à venir. La mise en oeuvre de la préservation des services vitaux et des ressources naturelles s'accompagne alors nécessairement de la prise en compte du concept d'irréversibilité.

L'irréversibilité se caractérise d'abord par son pouvoir "destructeur" sur l'environnement : l'utilisation de ressources à des fins de consommation indirecte est un choix irréversible puisque le stock est inéluctablement réduit. Le concept permet ainsi de mesurer l'impact d'un aménagement irréversible sur un site naturel (1).

Une autre caractéristique essentielle de l'irréversibilité peut être saisie à l'aide de la définition que donne C. HENRY : "A decision is considered irreversible if it significantly reduces for a long time the variety of choices that would be possible in the future" (2)

L'exemple du développement du parc électronucléaire français présenté dans le paragraphe précédent constitue un choix énergétique irréversible à la vue de cette définition : 80% de l'électricité produite est de l'électricité d'origine nucléaire en France. Comment dès lors envisager différemment l'origine de la production électrique dans les décennies à venir ? Un choix irréversible est donc tel que le principe de conservation n'est pas respecté et qu'il a pour effet de réduire les opportunités futures. A une décision qui compromet le principe de conservation, on associe donc un effet d'irréversibilité. A l'opposé, toute décision qui respecte le principe implique la disparition de l'effet d'irréversibilité.

En présence d'un éventail de choix possibles, il est impératif de retenir celui ne comportant pas d'irréversibilité - choix réversible ou choix flexible-, ou le cas échéant, celui doté d'un degré très faible d'irréversibilité - choix le moins irréversible.

L'absence d'irréversibilité associée à une décision prise aujourd'hui implique l'ouverture du champ des possibilités futures. Au contraire, choisir aujourd'hui une décision irréversible implique une réduction des choix futurs.

Préservation des ressources et effet d'irréversibilité sont donc deux concepts indissocia-

(1) J-P AMIGUES, "L'effet d'irréversibilité en économie de l'environnement", *Cahiers d'économie et sociologie rurales*, n°4, avril 1987, p.97-111.

(2) C. HENRY, "Investment decisions under uncertainty : the irreversibility effect", *The american economic review*, december 1974, vol.64, n°6, p.1006.

bles nécessaires à l'appréciation du patrimoine énergétique, entité contenant un corps de décisions séquentielles prises en présence d'incertitude.

La prise en compte de l'incertitude permet de relativiser en quelque sorte l'effet d'irréversibilité. Il convient de noter le caractère cumulatif de l'information dans le temps .

A. FISHER et J.V KRUTILLA ont développé un modèle de décision en présence d'incertitude et d'irréversibilité où la prise en compte de l'accroissement d'information dans le temps conduit à préférer le choix de préservation d'un espace naturel (1). Soit un horizon à deux périodes. Le problème est le suivant : quelle étendue de terre sauvage pourrait-êtré développée à chaque période ?

Ils supposent que le niveau maximum de développement ou de préservation est égal à l'unité. Le développement est supposé irréversible quelque soit la période. Les bénéfices issus du développement à la période 1 sont connus, mais ceux de la période 2 ne sont pas connus.

Les bénéfices -qui par hypothèse sont une fonction linéaire du niveau de développement - associés à un niveau donné de développement sont les bénéfices du développement et les bénéfices de la préservation.

A la première période, les bénéfices du développement sont : $B_{1d}(d_1) = a d_1$ (1)

d indique le développement,

d_1 : niveau de développement de la période 1,

a constante, $a > 0$ et $0 \leq d_1 \leq 1$

Les bénéfices de la préservation sont : $B_{1p}(d_1) = b - c d_1$ (2)

p indique la préservation, b et c sont des constantes, $b > 0$, $c > 0$

Les bénéfices de la période 1 sont donc :

$$B_1(d_1) = B_{1d}(d_1) + B_{1p}(d_1)$$

$$B_1(d_1) = b + (a-c) d_1 \quad (3)$$

(1) A.C. FISHER, J.V. KRUTILLA, "Economics of nature preservation", in KNEESE A.V., SWEE-NEY J.L., *Handbook of natural resource and energy economics*, vol.1, Elsevier science publishers B.V., 1985, p.180-185.

Si $a > c$, $d_1 = 1$

Si $a < c$, $d_1 = 0$

A la seconde période, les bénéfices sont : $B_2 (d_1 + d_2, \vartheta)$, $d_2 \geq 0$, $d_1 + d_2 \leq 1$

d_2 représente la quantité de terre développée à la période 2

ϑ est une variable aléatoire.

Ainsi, les bénéfices de la seconde période dépendent du développement effectué à la période 1 et à la période 2. Ces bénéfices sont incertains. FISHER et KRUTILLA considèrent que le problème à résoudre est la maximisation des bénéfices sur les deux périodes. C'est donc un problème en présence d'incertitude. Il y a incertitude sur la valeur des bénéfices escomptés à la période 2, bénéfices du développement et bénéfices de la préservation. Tout dépend du comportement de l'incertitude dans le temps : 2 cas sont envisagés.

Cas 1: la période 2 n'apporte aucune information sur la valeur de ϑ , de sorte que d_1 et d_2 sont choisis à la période 1.

Cas 2 : la valeur de ϑ est connue à la période 2, de sorte qu'il est sensé de reporter le choix de d_2 à la période 2. Hypothèse importante : la révélation dans ce cas de la valeur de ϑ ne dépend pas du développement de la période 1, d_1 .

Les valeurs à maximiser dépendent de la structure de l'information. Dans le cas où aucune information nouvelle n'est révélée à la période 2, on définit :

$$V^* (d_1) = B_1 (d_1) + \max_{d_2} (E (B_2 (d_1 + d_2, \vartheta))) \quad (4)$$

$$d_2$$

$$0 \leq d_1 + d_2 \leq 1$$

$$0 \leq d_2$$

La valeur maximum est $V^* = V^* (d_1^*)$ où d_1^* maximise $V^* (d_1)$ sous contrainte $0 \leq d_1 \leq 1$

Dans le cas où l'information nouvelle arrive à la période 2, on définit :

$$\hat{V} (d_1) = B_1 (d_1) + E \left[\begin{array}{l} \max_{d_2} (B_2 (d_1 + d_2, \vartheta)) \\ d_2 \\ 0 \leq d_1 + d_2 \leq 1 \\ d_2 \geq 0 \end{array} \right] \quad (5)$$

La valeur maximum est $\hat{V} = \hat{V}(d_1)$, où d_1 maximise $\hat{V}(d_1)$ sous contrainte $0 \leq d_1 \leq 1$

Une hypothèse "naturelle" selon les auteurs est : $d_1 \leq d_1^*$

Dans la mesure où une meilleure information sur les bénéfices futurs est possible, il est normal de différer le développement qui est irréversible. Autrement dit, en l'absence de perspective d'une meilleure information, le développement à la période 1 sera trop important. FISHER et KRUTILLA démontrent ce résultat pour un cas particulier : pas de développement ($dt = 0$) et développement total ($dt = 1$)

Ils comparent les deux alternatives possibles (développer et préserver) pour chaque structure de l'information. Quand aucune information n'arrive à la période 2, on a :

$$(6) \quad V^*(0) = B_1(0) + \max(E(B_2(0,\partial)), E(B_2(1,\partial)))$$

$$\text{et (7) } V^*(1) = B_1(1) + E(B_2(1,\partial))$$

$$\text{d'où : (8) } \begin{aligned} d_1^* &= 0, \text{ si } V^*(0) - V^*(1) \geq 0 \\ d_1^* &= 1, \text{ si } V^*(0) - V^*(1) < 0 \end{aligned}$$

Quand une information nouvelle est prise en compte, on a :

$$(9) \quad \hat{V}(0) = B_1(0) + E(\max(B_2(0,\partial), B_2(1,\partial)))$$

$$\text{et (10) } \hat{V}(1) = B_1(1) + E(B_2(1,\partial))$$

$$\text{d'où : (11) } \begin{aligned} \hat{d}_1 &= 0, \text{ si } \hat{V}(0) - \hat{V}(1) \geq 0 \\ \hat{d}_1 &= 1, \text{ si } \hat{V}(0) - \hat{V}(1) < 0 \end{aligned}$$

On remarque que $V^*(1) = \hat{V}(1)$

Si le développement est total à la première période ($d_1 = 1$), la valeur totale des bénéfices sur les deux périodes est la même quelque soit la structure de l'information.

$$\text{Par ailleurs, on a : } \hat{V}(0) - V^*(0) = E(\max(B_2(0,\partial), B_2(1,\partial)))$$

$$(12) \quad - \max(E(B_2(0,\partial)), E(B_2(1,\partial))) \geq 0$$

Puisque $\hat{V}(0) \geq V^*(0)$, et $V^*(1) = \hat{V}(1)$, alors $\hat{d}_1 \leq d_1^*$

Cela signifie que l'utilisation optimale de la surface à la période 1 est moins probable pour

un développement total si une information sur les bénéfices espérés est possible que si ce n'est pas le cas.

L'incertitude est mesurée par la structure de l'information. L'effet irréversibilité est maximum quand aucune information sur les bénéfices futurs n'est attendue par le décideur : l'option développement est engagée à la période 1 et la quantité de terre développée est très élevée. ($d_1 \leq d^*1$) Par contre, s'il pense qu'une meilleure information sur ces bénéfices est envisageable, l'effet d'irréversibilité est minimum : le développement de la terre n'est pas réalisé à la période 1 et est reporté à la période 2.

Le décideur, compte tenu de la croissance de l'information dans le temps, retient le choix flexible qui est le non développement de la terre donc sa préservation. Ainsi, plus la structure d'information est variable, autrement dit plus l'incertitude est grande, plus les choix doivent être des choix flexibles. De ce fait, on évite de figer les choix à venir en maintenant un potentiel de réponses jusqu'à la levée de l'incertitude. Comme avec l'écoulement du temps, l'incertitude se réduit, on est conduit à retarder certaines décisions.

Quand on considère le système énergétique, la stratégie d'attente d'une nouvelle information et le report de décision qui en résulte peut être discutée. Considérons la combustion des ressources fossiles et la teneur en CO₂ atmosphérique. Le recours accru à ces ressources est un facteur essentiel de l'augmentation du CO₂ atmosphérique. Sachant que l'information est croissante dans le temps, il est cependant erroné de penser que la combustion des ressources fossiles doit se poursuivre afin d'obtenir une meilleure information sur ces conséquences atmosphériques. Par ailleurs, compte tenu des délais existants entre la cause et l'effet, une stratégie d'acquisition d'information peut se révéler dangereuse.

Entre le moment où la combustion libère du CO₂ dans l'atmosphère et le moment où son accumulation va entraîner un réchauffement effectif et irréversible de la planète, il existe un décalage temporel très étendu. Une telle stratégie d'attente peut s'accompagner d'un effet d'irréversibilité maximum alors que l'option optimale consisterait à agir de manière urgente. Un choix flexible n'est donc pas nécessairement et seulement un choix "d'attente" en présence d'accumulation de l'information. Il peut être un choix actif de mobilisation des moyens efficaces, moyens destinés à préserver les options futures. Cette voie est développée par J.C HOURCADE, G.MEGIE, J.THEYS qui préconisent une stratégie anticipatrice dont l'objectif est une meilleure maîtrise de l'énergie et une réorientation des politiques énergétiques (1).

(1) J-C HOURCADE, G. MEGIE, J. THEYS, "Politiques énergétiques et risques climatiques, comment gérer l'incertitude ?", *Futuribles*, septembre 1989, p.49-55.

Les solutions techniques proposées autorisant une réduction du risque de modification irréversible des climats sont notamment : l'amélioration de l'efficacité énergétique, les substitutions inter-énergétiques, le traitement du CO₂ émis, la réduction de la demande d'énergie.

Cet ensemble de mesures permet une ouverture des choix futurs mais aussi autorise un accroissement de l'information dans le temps.

Dans le cadre de substitutions inter-énergétiques, il s'agit de renoncer à consommer une quantité de ressource fossile et de lui substituer une consommation équivalente de ressource renouvelable.

La renonciation à un élément de stock aujourd'hui en vue de le consommer dans une période future constitue un sacrifice présent dont on peut espérer qu'il apportera un bénéfice futur (exploitation plus efficace) compte tenu de l'accumulation de l'information dans le temps et du progrès technique. Prendre en compte l'information croissante dans le temps, donc conserver les ressources, permet d'accorder une place à des événements aléatoires qui peuvent se manifester et autorise aussi le temps nécessaire au développement et à la diffusion des techniques.

Le système énergétique devient alors parfaitement flexible :

- aucune option de nature à détruire les ressources naturelles et comportant une réduction inévitable des services vitaux n'est retenue,
 - aucune restriction du champ des choix futurs n'est réalisée,
- l'investissement dans l'information est respecté et permet la protection des ressources fossiles et la diffusion de techniques nouvelles (cogénération par exemple).

J.M MARTIN a souligné que la diffusion des techniques est un élément clé pour une plus grande flexibilité du système énergétique (1).

La prise en compte de l'accumulation de l'information dans le cadre du principe de conservation est donc fondamentale. Elle constitue une barrière à l'effet d'irréversibilité. L'accroissement de l'information réduit ainsi l'intérêt que pouvait présenter la décision irréversible et favorise les décisions flexibles.

(1) J-M MARTIN, "Energie et changement technologique : les enseignements des quinze dernières années", *Problèmes économiques*, 19.09.90, p.23-25.

Section 2 - Les apports de la théorie de la valeur d'option

§ 1 - Origine et développement de la théorie

La théorie de la valeur d'option est une théorie de la décision avec incertitude et irréversibilité. C'est dans le cadre de l'économie de l'environnement qu'elle s'est d'abord développée avec les travaux de WEISBROD en 1964. Son analyse s'inscrit dans le cadre de décisions aux conséquences irréversibles en présence d'incertitude relative à la demande. Il définit alors le concept de valeur d'option comme la valeur attachée à la préservation d'un site naturel. En présence d'incertitude sur la demande pour un site naturel, il existe une valeur d'option associée à l'option conservation pour des individus de la collectivité.

Un individu qui a une incertitude sur l'utilisation à des fins de récréation d'un parc naturel est prêt à payer une somme d'argent en plus de son surplus du consommateur pour conserver la possibilité de cet usage. Afin de conserver la possibilité de disposer du site dans l'avenir (aménités), certains individus sont donc prêts à payer une somme d'argent. Autrement dit, la valeur d'option est un consentement à payer une sorte de prime de risque afin de conserver la possibilité d'un usage futur des ressources naturelles.

Là où existe la valeur d'option, il y a donc une attitude qui consiste à éviter l'activité porteuse d'effet d'irréversibilité sur l'environnement. Cette approche a fait l'objet de développements avec notamment la notion de prix d'option (1). En incertitude, c'est le prix d'option qui constitue la mesure correcte du bien être. Ce prix est le maximum que souhaitera payer un individu pour une option d'utilisation.

Soit PO, le prix d'option attaché à l'usage d'un actif naturel.

Soit E (SC), l'espérance mathématique du surplus du consommateur (mesuré par la variation compensatrice de l'utilité).

La valeur d'option s'exprime comme la différence entre ces deux termes :

$$VO = PO - E (SC)$$

Elle s'explique par une prime d'aversion à l'égard du risque.

(1) B. DESAIGUES, P. POINT, "Les méthodes de détermination d'indicateurs de valeur ayant la dimension de prix pour les composantes du patrimoine naturel", *Revue économique*, n°2, mars 1990, p.285-289.

La valeur d'option peut être nulle, positive ou négative. Généralement, on considère que pour un individu aversif à l'égard du risque (fonction d'utilité strictement convexe), le prix d'option sera supérieur au surplus attendu. Dans ce cas, la valeur d'option sera positive. Par contre, pour un individu préférant le risque (fonction d'utilité strictement concave), le prix d'option sera inférieur au surplus attendu ; la valeur d'option est alors négative.

B. DESAIGNES et P. POINT parviennent à une conclusion importante :

"Dans le cas où l'offre est incertaine mais la demande est sûre, le consentement maximal à payer pour éviter le risque (pollution, fermeture d'un parc ...) est supérieur à la variation attendue du surplus, pour un individu risque aversif, et son importance dépendra de la concavité de la fonction d'utilité. Lorsqu'à l'incertitude de l'offre s'ajoute celle de la demande, la conclusion est beaucoup moins claire et l'on considère que seuls les travaux empiriques permettront de clarifier le problème" (1). Finalement, la valeur d'option telle qu'elle a été définie dépend du comportement de l'individu à l'égard du risque. D'où la difficulté de l'évaluer correctement en présence d'incertitude.

Au début des années 1970, d'autres travaux sont apparus et ont donné une nouvelle interprétation du concept. C'est la naissance de la théorie dynamique de la valeur d'option avec les articles de ARROW et FISHER (1974) et de HENRY (1974) (2).

Deux différences essentielles peuvent être notées avec la première approche : d'une part, le décideur est neutre face au risque, d'autre part, il s'agit d'une approche temporelle séquentielle. Le statique est abandonné. Le concept de quasi valeur d'option ou "valeur de quasi-option" selon la terminologie de ARROW et FISHER (3) se définit comme la disponibilité à payer une somme d'argent pour conserver la possibilité d'une option dans le futur. La valeur de quasi-option résulte de la prise en compte du degré de flexibilité des décisions et de l'existence d'une information croissante.

Cette valeur a pour source la possibilité de reporter un choix irréversible en présence d'incertitude, alors que celle-ci diminue au fur et à mesure de l'écoulement du temps. La valeur de quasi-option ne résulte donc pas d'une aversion pour le risque.

(1) B. DESAIGNES, P. POINT, opus cité, p.288-89.

(2) K.J. ARROW, A.C. FISHER, "Environmental preservation, uncertainty and irreversibilities", *Quarterly Journal of economics*, may 1974, n°2, p.312-319.

C. HENRY, "Investment decisions under uncertainty : the "irreversibility effect", *The american economic review*, dec. 1974, vol.64, n°6, p.1006-1012.

(3) Nous préférons employer le terme "valeur de quasi-option" dans notre exposé.

Alors que la valeur d'option est une prime de risque, la valeur de quasi-option est la valeur de l'information ou de la flexibilité (1).

Elle va permettre dans le cadre d'un modèle séquentiel de décision avec information croissante, de retenir les options les moins irréversibles et donc de garder ouvert le champ des options pour le futur. Dans un modèle séquentiel avec information croissante, l'acquisition d'information est progressive selon un processus bayésien.(2)

Il y a donc un apprentissage qui conduit à des décisions mieux fondées du fait d'une révision constante des distributions de probabilités.

Les décisions initiales prennent en compte les gains informationnels successifs connus sur lesquels les décisions futures seront engagées. C'est un comportement à la base de l'"effet irréversibilité" chez C. HENRY. Cet effet est ainsi favorable aux décisions flexibles, décisions gardant ouvert le champ des choix futurs.

Dans le modèle de A.FISHER et J.V KRUTILLA présenté dans le paragraphe précédent, cette valeur s'écrit (3) :

$O V = \hat{V}(0) - V^*(0)$ (les auteurs l'appellent toujours "option value") Et cette valeur est non-négative (équation 12)

En tenant compte de l'accroissement de l'information, le décideur compare $\hat{V}(0)$ et $\hat{V}(1)$ en introduisant une prime à la conservation. En l'absence d'information croissante, il compare $V^*(0)$ et $V^*(1)$.

Soit S cette prime, S vérifie : $(V^*(0) + S) - V^*(1) = \hat{V}(0) - \hat{V}(1)$
 $\xrightarrow{\text{-----}} S = (\hat{V}(0) - \hat{V}(1)) - (V^*(0) - V^*(1))$
 Comme $V^*(1) = \hat{V}(1)$, $S = \hat{V}(0) - V^*(0)$

S correspond à la valeur supplémentaire accordée à l'option conservation qui serait négligée dans une décision ne tenant pas compte des gains d'information dans le futur.

FISHER et KRUTILLA remarquent que la valeur d'option ne peut être identifiée avec la valeur escomptée de l'information parfaite. En effet, dans leur interprétation, la valeur d'op-

(1) P. CRABBE, "Valeurs d'option et de quasi-option des ressources naturelles", in G. GAUDET et P. LASSERRE, *Ressources naturelles et théorie économique*, 1986, p.254.

(2) A. RICHARD, "Quelques applications financières de la valeur d'option : structure des taux d'intérêt et actifs conditionnels", in P. COHENDET, P. LLERENA, *Flexibilité, information et décision*, 1989, p.200-204.

(3) A. FISHER, J.V. KRUTILLA, "Economics of nature preservation", in KNEESE A.V., SWEE-NEY J.L., *Handbook of natural resources and energy economics*, vol.1, 1985, p.185-186.

tion est une valeur conditionnelle de l'information, qui dépend de l'évènement $d_1 = 0$.

La valeur de l'information non conditionnelle s'écrit $\hat{V}(d_1) - V^*(d_1^*)$. C'est le gain informationnel que l'on peut obtenir sur les bénéfices escomptés de d_1 . Ce gain doit être optimal. Deux résultats sont possibles.

Cas 1 : $\hat{d}_1 = d_1^* = 1$, la valeur de l'information est : $\hat{V}(1) - V^*(1) = 0$
la valeur d'option est : $\hat{V}(0) - V^*(0) \geq 0$

Cas 2 : $\hat{d}_1 = 0$, $d_1^* = 1$, la valeur de l'information est : $\hat{V}(0) - V^*(1)$

la valeur d'option est encore plus grande que la valeur de l'information puisque :

$$\hat{V}(0) \geq \hat{V}(1) = V^*(1) \geq V^*(0)$$

Nous pouvons donc constater que la valeur d'option est une valeur conditionnelle dépendant du choix de développement à la première période, et qu'elle est peut être soit égale soit supérieure à la valeur de l'information (non conditionnelle).

L'exposé de FISHER et KRUTILLA se situe dans le prolongement du modèle de ARROW et FISHER et des développements de C. HENRY. Considérons tout d'abord les apports de ARROW et FISHER. (1) Leur modèle présente l'importance de l'amélioration de l'information en présence de décisions irréversibles dans le cadre d'un espace naturel. Ils vont introduire explicitement la valeur conditionnelle de l'information dans les bénéfices escomptés d'un aménagement du site naturel.

Les gains informationnels sont en quelque sorte des gains attendus déterminés par les décisions passées. Ils considèrent que le décideur est neutre vis à vis du risque. Soit une zone naturelle et un horizon à deux périodes.

Soient d_1 , la quantité de terre développée à la première période

d_2 , la quantité de terre développée à la deuxième période

b_p , les bénéfices liés à la préservation de l'espace à la période 1

b_d , les bénéfices liés au développement à la période 1

β_p , les bénéfices escomptés, conditionnés par b_p et b_d , de la préservation à la seconde période

β_d , les bénéfices escomptés du développement à la seconde période, conditionnés par b_p et b_d

(1) K.J. ARROW, A.C. FISHER, opus cité.

A la première période, le décideur décide d'engager ou non le développement d'une partie du site. A la seconde période, il constate les valeurs de βd et βp et décide alors si il doit poursuivre ou stopper le développement.

Les 2 options (développer et conserver) à la seconde période donnent des bénéfices βp et βd , bénéfices conditionnels.

L'option développement est irréversible : si $d_1 > 0$, $d_2 > 0$.

Cette option s'accompagne de coûts d'investissements.

Soit C_1 , le coût relatif à la période 1.

Soit C_2 , le coût relatif à la période 2.

L'option conservation est supposée n'induire aucun coût. Les deux options diffèrent entre elles par leur degré d'irréversibilité et par les bénéfices escomptés qu'elles génèrent.

Le modèle de décision est le suivant :

compte tenu du gain informationnel de la seconde période, il s'agit de déterminer la quantité d_2 qui maximise les bénéfices escomptés, conditionnés par les bénéfices réalisés à la période 1.

$$\text{Si } \beta d - \beta p > C_2, \text{ alors } d_2 = 1 - d_1$$

$$\text{Si } \beta d - \beta p < C_2, \text{ alors } d_2 = 0$$

On définit : $z = \beta d - \beta p$, $w = \beta d - \beta p - c_1$

w est le différentiel de bénéfices nets pour la période 1

z est le différentiel des bénéfices conditionnels pour la période 2

et on définit l'évènement A, tel que $z > C_2$

A exprime le fait que le développement présente un intérêt à la période 2.

L'espérance des bénéfices escomptés d'un développement ($d_1 > 0$) à la période 1 est :

$$E ((w + \min(C_2, z)) d_1 + \beta p + \max(\beta d - C_2, \beta p))$$

L'espérance des bénéfices escomptés d'une préservation à la période 1 ($d_1 = 0$) est :

$$E (\beta p + \max(\beta d - C_2, \beta p))$$

La différence entre $d_1 > 0$ et $d_1 = 0$ dans les bénéfices attendus est alors :

$$E ((w + \min(C_2, z)) d_1)$$

C'est le signe de cette expression qui va déterminer la décision optimale.

	($d_1 > 0$) Ensemble des bénéfices attendus d'un développement à la période 1	($d_1 = 0$) Ensemble des bénéfices attendus de la préserva- tion à la période 1
Evènement A se réalise $z > C_2$	$w d_1 + C_2 d_1 + b p + \beta d - C_2$	$b p + \beta d - C_2$
Evènement A ne se réalise pas $z < C_2$	$w d_1 + z d_1 + b p + \beta p$	$b p + \beta p$

D'après ARROW et FISHER, p. 316.

Si $E((w + \min(C_2, z)) d_1) > 0$, alors il est intéressant de développer à la première période ; si l'expression est négative, $d_1 = 0$.

Les auteurs supposent que le décideur ignore l'hypothèse d'accroissement de l'information, il ignore l'incertitude. z et w sont remplacés par des nombres connus $E(z)$ et $E(w)$. Il ne prend pas en compte la possibilité d'utiliser les gains informationnels à la fin de la période 1. Compte tenu de l'information dont il dispose à la période 1, son critère de choix est alors : $E(w) + \min(C_2, E(z))$

c'est à dire : $E(w) + C_2$ si $C_2 < E(z)$
 $E(w) + E(z)$ si $C_2 > E(z)$

Prenons le cas où $C_2 < E(z)$: autrement dit, il est intéressant de développer à la seconde période, le critère est : $E(w) + C_2$

On a : $\min(C_2, Z) \leq C_2$ et $P(\min(C_2, Z) < C_2) > 0$,

alors : $E(\min(C_2, Z)) < C_2$ et $E(W + \min(C_2, Z)) < E(W) + C_2$

La valeur escomptée des bénéfices en incertitude est inférieure à la valeur des bénéfices en l'absence d'incertitude. Cela est aussi vérifié pour $C_2 > E(Z)$.(1)

Dans la mesure où il y a incertitude sur les bénéfices escomptés d'un développement, il est préférable de réaliser un sous-investissement à la période 1 plutôt qu'un sur-investisse-

(1) K.J. ARROW, A.C. FISHER, opus cité, p.317.

ment puisque le développement est irréversible.

L'effet d'irréversibilité implique une réduction des bénéfices attendus. Compte tenu de l'accroissement de l'information à la période 2, le sous-investissement pourra être corrigé ; ce qui n'aurait été possible dans le cas d'un sur-investissement.

La différence entre les deux termes de chaque côté de l'inégalité peut être considérée comme la perte de la valeur de quasi-option du fait de la destruction irréversible de l'espace naturel à la période 1, en présence d'incertitude. La valeur de quasi-option liée à la conservation du site est donc la valeur de la flexibilité. Il existe une valeur de quasi-option à retarder un choix comportant un effet d'irréversibilité et cela, en dehors de toute prise en compte du risque. Cette valeur est positive : le choix de l'option conservation - option réversible - à la période 1 qui autorise l'utilisation de gains d'information au début de la période 2 est un choix optimal en présence d'incertitude sur des bénéfices issus du développement et compte tenu de l'irréversibilité de l'aménagement du site naturel. Ce choix optimal dépend donc du degré de flexibilité des décisions.

En incertitude, il existe ainsi une valeur de quasi-option associée au report des décisions irréversibles.

La prise en compte de l'effet d'irréversibilité et de l'amélioration de l'information génère une valeur d'option. L'effet d'irréversibilité ou la préférence pour la flexibilité est lié à un changement du contexte informationnel du décideur.

C. HENRY considère que la valeur de quasi-option qu'il appelle valeur d'option existe dès lors que l'on évolue en univers incertain, qu'il existe des degrés différents de flexibilité des décisions et que des gains informationnels peuvent être livrés avec le passage du temps. Dans ces conditions, cette valeur est nécessairement positive : face à un choix irréversible, il existe une valeur d'option positive associée à l'option flexible.(1)

Pour B.S. BERNANKE, la valeur d'option est aussi une valeur positive. Elle correspond à la somme d'argent que le décideur serait prêt à payer en $t + 1$ pour disposer du droit d'annuler un engagement antérieur réalisé en t . (2). Elle équivaut donc au regret maximum que le décideur pourrait avoir s'il choisissait la décision irréversible en début d'horizon. Dans son modèle, il considère un investisseur qui a le choix entre plusieurs projets techni-

(1) C.HENRY, "Option values in the economics of irreplaceable assets", *Review of Economic Studies*, 1974, p.89-104.

(2) B.S. BERNANKE, "Irreversibility, uncertainty, and cyclical investment", *Quarterly journal of economics*, february 1983, p.90.

ques de production. Quelque soit le projet retenu, il constitue un choix irréversible. La flexibilité consiste alors à différer le choix afin de disposer de plus d'information sur les techniques en présence.

En univers incertain, la théorie dynamique de la valeur d'option permet d'effectuer des choix flexibles et préserve les espaces naturels en retardant les choix d'aménagement. Après l'avoir exposée, nous allons à présent utiliser ses éléments essentiels dans le cadre des ressources énergétiques. Peu de recherches ont été réalisées dans ce domaine. Nous serons amenés à présenter l'intérêt et les limites de la théorie.

§ 2 - Applications de la valeur de quasi-option aux choix énergétiques en présence d'incertitude

De récents travaux ont été réalisés afin de resituer l'intérêt de la valeur d'option dans l'appréciation de choix énergétiques flexibles lorsque le décideur est placé en univers incertain. Nous nous référons ici aux travaux de G.LAMBERT sur la recherche d'une flexibilité de l'appareil productif en présence d'incertitudes sur les prix des énergies. Il montre à travers un modèle comportant des hypothèses sur l'évolution des prix des énergies, quels sont les différents moyens que peut mettre en oeuvre un entrepreneur pour "flexibiliser" son appareil de production face aux incertitudes énergétiques (1). Deux types de flexibilité sont mis en évidence.

Un premier type de flexibilité consiste en une flexibilité financière : c'est l'attente stratégique en présence d'accroissement d'information. Le comportement d'attente pour disposer d'une meilleure information sur les prix des énergies caractérise ainsi une flexibilité de nature financière. Cette attitude résulte de deux effets combinés au moment de la prise de décision : l'irréversibilité de l'investissement et l'incertitude sur le prix de l'énergie. Dans ce cas, l'auteur est conduit à définir une valeur d'option associée à la décision la plus flexible qui est ici l'attente.

Les hypothèses du modèle sont les suivantes. Il considère un horizon à deux périodes. Deux énergies sont disponibles sur le marché : l'énergie "classique" (notée f) et l'énergie "nouvelle" (notée e).

Un entrepreneur doit décider au début de la première période d'effectuer un investissement de remplacement ou de modernisation d'un équipement énergétique (générateur d'énergie). Il est supposé neutre à l'égard du risque. Cet équipement fonctionne avec l'énergie "classique". D'autres équipements fonctionnant avec l'énergie "nouvelle" sont cependant disponible sur le marché.

(1) - G. LAMBERT, "La bi-énergie comme adaptation de l'appareil productif aux incertitudes énergétiques : la flexibilité amont", in P. COHENDET et al., *Flexibilité, information et décision*, 1989, p.235-256.

- G. LAMBERT, "Modèle de décision avec information endogène : application aux investissements énergétiques", *Evolutions économiques et théories de l'information*, BETA/CNRS, mars 1987.

Il existe une incertitude sur le prix futur de l'énergie classique ; le prix de l'énergie nouvelle est supposé constant sur les deux périodes.

Deux états du monde sont donc possibles :

l'état "i", $p(i) = \pi$, où le prix de l'énergie "classique" (noté p_f) est inchangé,

l'état "j", $p(j) = 1 - \pi$, où le prix de l'énergie "classique" (p_f) augmente.

G. LAMBERT suppose que ce changement de prix anticipé par l'entrepreneur est définitif et que la structure d'information est parfaite (à la fin de la première période, le décideur connaît le prix de l'énergie classique qui prévaut à la seconde période).

Compte tenu de ces hypothèses, deux choix sont possibles :

- en début d'horizon, l'entrepreneur décide d'acheter un équipement neuf fonctionnant avec l'énergie "classique". C'est l'option irréversible (d) : le coût de l'investissement épuise les ressources financières de l'entrepreneur à la période 2 ; il ne peut donc revenir sur son choix à la seconde période,

- en début d'horizon, l'entrepreneur décide d'attendre une période pour choisir la technique. Il réalise seulement un investissement de modernisation dont le coût est inférieur à celui nécessaire pour l'achat d'un équipement neuf. Cette option est flexible (d) : à la période 1, le renouvellement de l'équipement "classique" est reporté à la seconde période où le décideur disposera d'une information supplémentaire sur le prix de l'énergie.

Le choix d'une énergie impose le choix d'un équipement particulier dont la rentabilité dépend du seul niveau des prix des énergies (les prix des autres facteurs sont constants). Le décideur effectue le classement suivant :

$$r_{f,i}^N = r_{f,j}^N > rf > re > r_{f,i}^N$$

"re" est le bénéfice procuré par l'investissement dans un équipement à énergie "nouvelle".

"rf" est le bénéfice procuré par le maintien de l'ancien équipement.

" $r_{f,i}^N$ " est le bénéfice procuré par le renouvellement de l'ancien équipement à la première période ; il devient $r_{f,i}^N$ et $r_{f,j}^N$, dans les états "i" et "j".

Le bénéfice total escompté actualisé, associé à la décision irréversible s'écrit :

$$B(\bar{d}) = r_{f,j}^N + \pi r_{f,i}^N + (1 - \pi) r_{f,i}^N$$

Le bénéfice total espéré actualisé, associé à la décision non irréversible s'écrit :

$$B(d) = rf + \pi r_{f,i}^N + (1 - \pi) re$$

La stratégie flexible sera préférée à la stratégie irréversible si elle maximise le profit espéré de l'entrepreneur :

$$\begin{array}{c} \text{B}(d) > \text{B}(d) \\ \leftarrow \text{-----} \right. \quad \underbrace{(1 - \pi) (re - r^{N_f, j})}_{> 0} > \underbrace{r^{N_f} - rf}_{> 0} \end{array}$$

G. LAMBERT emploie le concept de valeur d'option selon la définition de B.S BERNANKE. C'est la valeur maximale du regret que pourrait avoir l'entrepreneur dans la seconde période de s'il avait retenu, à tort, en début d'horizon, l'option irréversible (d).

La valeur d'option est : $(1 - \pi) (re - r^{N_f, j})$: c'est la perte maximum que le décideur pourrait subir demain s'il choisit "d" aujourd'hui. $(r^{N_f} - rf)$ représente les gains certains que le décideur ferait s'il avait choisi "d" en début d'horizon. Ils représentent le coût de la flexibilité "c'est à dire la perte certaine que le décideur est prêt à subir pour conserver la possibilité de choisir en connaissance des états du monde" (1).

La prise en compte de l'existence de la valeur d'option en présence d'information croissante (ici sur le prix d'une énergie) conduit le décideur à rejeter l'option irréversible. En effet, si d est choisie en début d'horizon, il existe une perte future probable supérieure au bénéfice procuré par cette décision à la première période (voir inégalité).

Si il choisit d en début d'horizon et si c'est l'état i qui est observé à la deuxième période, le coût de ce choix erroné est $(r^{N_f} - rf)$.

La stratégie d'attente qui se caractérise par un refus d'investir en conservant les liquidités et par l'acceptation de l'entrepreneur d'une rentabilité réduite correspond pour l'auteur à la recherche d'une flexibilité financière en présence d'incertitude sur les prix de l'énergie. Cette stratégie flexible ne diminue pas l'incertitude mais limite le risque lié à une incertitude qui demeure totale.

(1) G. LAMBERT, opus cité, p.242.

Le second type de flexibilité développé par G.LAMBERT concerne la flexibilité physique du capital productif ou flexibilité amont : il s'agit de la bi-énergie. Cette flexibilité suppose une stratégie différente de l'entrepreneur.

A l'origine, figure la prise en compte d'une tarification de l'énergie d'inspiration marginaliste pour l'énergie "nouvelle". Le tarif est aussi modulé en deux tranches (été - hiver). La bi-énergie repose sur la substituabilité des énergies : un entrepreneur peut faire fonctionner un procédé de production avec alternativement plusieurs énergies.

G. LAMBERT démontre que la stratégie optimale de l'entrepreneur consiste à se doter d'un équipement surdimensionné qui permet de produire toujours avec l'énergie la moins honéreuse.

C'est une flexibilité en terme physique qui s'exprime à travers la solution bi-énergie. Quelque soit l'état de nature, l'option bi-énergie est la plus avantageuse. Cependant, la différence avec le modèle de décision relatif à la flexibilité financière est que ce modèle écarte les effets de la valeur d'option. L'arbitrage entre gains présents certains et bénéfices futurs incertains disparaît (1).

Nous pouvons, en nous inspirant des apports de G. LAMBERT, formuler un modèle de décision au sein duquel la valeur de quasi-option va nous permettre d'effectuer un choix énergétique en présence d'incertitude sur l'évolution de la demande d'énergie.

Nous considérons un modèle à deux périodes, $t = 1, 2$. La première période correspond au court terme, la seconde au long terme. La première fait donc implicitement référence aux générations présentes tandis que la seconde se réfère aux générations futures. En début d'horizon, un décideur a le choix entre deux options (2) :

- l'option "épuisement" : cette stratégie consiste à puiser dans le stock de ressources fossiles afin de satisfaire les besoins énergétiques (c'est la situation réelle dans laquelle nous sommes aujourd'hui). La perennité des ressources dont le stock diminue inexhorablement dans le temps n'est donc pas assurée. Cette option est irréversible (d)
- l'option "conservation" : cette stratégie consiste à limiter le recours aux ressources fossiles dans le but d'assurer la perennité des ressources (conservation partielle en vue d'une utilisation ultérieure meilleure du fait de l'accumulation de l'information - relative aux préfé-

(1) G. LAMBERT, opus cité, p.248.

(2) le décideur est un agent fictif dont l'objectif est la satisfaction des besoins énergétiques des générations sur l'ensemble de l'horizon.

rences par exemple- et du progrès technique). Elle implique de se tourner vers les ressources renouvelables pour la satisfaction des besoins. Cette option est non irréversible. Elle est notée "d".

Le décideur est supposé neutre à l'égard du risque. Le choix entre ces deux options possibles dépend de la réalisation de deux événements aléatoires :

E1 = stabilisation des besoins énergétiques et diminution des émissions de CO2

E2 = croissance des besoins énergétiques et des émissions de CO2

Les émissions de CO2 sont fonction croissante du taux d'utilisation des ressources fossiles.

On note : $P(E1) = \pi$ et $P(E2) = (1 - \pi)$

Soient b_1^E et b_1^C les bénéfices retirés de l'option \bar{d} et \underline{d} respectivement à la période 1.

Soient b_2^E et b_2^C les bénéfices retirés de l'option \bar{d} et \underline{d} respectivement à la période 2.

Nous supposons pour simplifier que le taux d'actualisation est nul.

L'incertitude porte sur les bénéfices futurs escomptés des deux options en présence.

En début de période 1, on suppose : $b_1^E > b_1^C$

L'option "épuisement" s'accompagne dans l'immédiat d'un bénéfice plus important que l'option "conservation" à la première période. Cela s'explique du fait de l'avance technologique dont dispose l'exploitation des ressources fossiles sur celles des ressources renouvelables (solaire par exemple).

Compte tenu des événements E1 et E2, on peut apprécier les bénéfices escomptés retirés des deux options à la deuxième période.

Si l'évènement E1 se produit, les ressources fossiles génèrent un bénéfice plus élevé que si E2 se produit ; dans le cas où on observe E2, le bénéfice de la période 2 se trouve diminué du fait des émissions générées par l'activité d'extraction-utilisation :

$$(b_2^E)_{E1} > (b_2^E)_{E2}$$

Une situation opposée s'observe pour les bénéfices issus de la conservation des ressources : ceux-ci sont d'autant plus élevés que les besoins énergétiques augmentent entraînant la dilapidation des ressources fossiles et leur raréfaction.

Le sentiment de conserver les ressources épuisables est fonction de la sensibilité éprouvée à l'égard de la diminution du stock in situ :

$$(b_2^c)_{E1} < (b_2^c)_{E2}$$

A la deuxième période, la valeur de b_2^e est influencée par les événements E1 et E2. Quand la demande énergétique est stable (E1), les émissions de CO2 peuvent diminuer ; dans ces conditions, on a : $(b_2^e)_{E1} > (b_2^c)_{E1}$

Au contraire, si elle augmente, les rejets vont augmenter à leur tour et :

$$(b_2^e)_{E2} < (b_2^c)_{E2}$$

Finalement, on a : $(b_2^e)_{E1} > (b_2^c)_{E2} > (b_2^c)_{E1} > (b_2^e)_{E2}$

Il est possible de déterminer le bénéfice espéré (noté B) sur les deux périodes en additionnant les bénéfices dégagés sur chacune des périodes :

- Bénéfice associé à la décision irréversible d :

$$\overline{B(d)} = b_1^e + \pi (b_2^e)_{E1} + (1 - \pi) (b_2^e)_{E2}$$

- Bénéfice associé à la décision flexible d :

$$B(d) = b_1^c + \pi \cdot \text{Max}((b_2^c)_{E1}; (b_2^e)_{E1}) + (1 - \pi) \cdot \text{Max}((b_2^c)_{E2}; (b_2^e)_{E2})$$

Compte tenu des hypothèses, B (d) s'écrit :

$$B(d) = b_1^c + \pi (b_2^e)_{E1} + (1 - \pi) (b_2^c)_{E2}$$

A partir de là, il est possible d'effectuer un choix entre les deux stratégies à partir du concept de valeur d'option. L'option "conservation" sera retenue si :

$$\overline{B(d)} > B(d)$$

$$\langle \text{----} \rangle \quad b_1^c + \pi (b_2^e)_{E1} + (1 - \pi) (b_2^c)_{E2} > b_1^e + \pi (b_2^e)_{E1} + (1 - \pi) (b_2^e)_{E2}$$

$$\langle \text{----} \rangle \quad (1 - \pi) ((b_2^c)_{E2} - (b_2^e)_{E2}) > b_1^e - b_1^c$$

Le membre de gauche représente la perte maximum que supporterait le décideur à la période 2 s'il choisit à la période 1 l'option irréversible. C'est l'expression de la valeur d'option ; elle est toujours positive. A droite de l'inégalité, figurent les gains certains de la première période.

Si l'option flexible est retenue, le décideur s'engage alors à renoncer à ces gains pour bénéficier de gains informationnels à la deuxième période. $(b_1^e - b_1^c)$ est le coût de la flexi-

bilité. Si l'inégalité est vérifiée, choisir l'option "épuisement" implique une perte future supérieure au bénéfice engendré par cette décision à la période 1.

Le décideur a intérêt à retenir la stratégie flexible puisqu'il pourra bénéficier d'une meilleure information sur les besoins énergétiques et donc sur les émissions de CO₂ générés par les ressources fossiles en adoptant un comportement d'attente. La préservation des ressources aujourd'hui permettra aux générations futures (période 2) d'en disposer de manière plus efficace.

En présence d'incertitude, il existe une valeur d'option qui évite les décisions irréversibles. La flexibilité de l'option conservation est double : elle est basée sur un comportement d'attente avec la limitation des ressources fossiles et sur la prise en compte de l'information croissante avec le report de l'opportunité d'utiliser la ressource dans le futur (à des fins de consommation directe ou indirecte). Elle repose sur l'application du principe de conservation dans un univers à information croissante.

L'intérêt de la valeur d'option pour trancher sur des choix énergétiques en présence d'incertitude sur les prix ou sur la demande d'énergie apparaît clairement. Cependant, il comporte dans la réalité des difficultés d'évaluation qui peuvent en limiter sa pertinence.

§ 3 - Les difficultés de la mesure du concept

Les limites de la mesure du concept de valeur d'option trouvent leur origine dans le corps d'hypothèses retenu à partir duquel les différents choix vont être appréciés.

L'étude de A.C FISHER, J.V KRUTILLA et de C.J CICCHETTI permet d'apprécier les difficultés posées par ce concept dans le cadre de l'exemple du Hells Canyon dans le Colorado (1). Le problème qu'ils ont traité peut se résumer ainsi : il s'agit d'arbitrer entre deux utilisations particulières du Hells Canyon, l'une irréversible est relative à l'emploi du site pour la construction d'un barrage, l'autre non irréversible consiste à préserver le site à l'état sauvage à des fins récréatives ou de loisirs.

Afin de déterminer quelle option est préférable, ils se demandent quelle doit être la valeur du bénéfice généré la première année par l'option "préservation" pour que les bénéfices actualisés associés à cette option soient égaux ou supérieurs à ceux de l'option "construction du barrage" (2).

On note B_0^b , le bénéfice de la première année pour l'option "construction du barrage" et B_0^p celui associé à l'option "préservation".

La valeur de B_0^p est telle que :

$$(1) \quad B_0^p = \frac{\sum_{t=1}^T \frac{B_0^b}{(1+\pi)^t (1+i)^t}}{\sum_{t=1}^T \frac{(1+a)^t}{(1+i)^t}}$$

T, horizon pour l'alternative "construction du barrage"

(1) - A.C. FISHER, J.V. KRUTILLA, C.J. CICCHETTI, "The economics of environmental preservation : a theoretical and empirical analysis", *American economic review*, september 1972, vol. LXII, n°4, p.605-619.

- J.V. KRUTILLA, A.C. FISHER, *The economics of natural environments*, The John Hopkins University press, 1975, p.122-150.

(2) A.C. FISHER et a., opus cité p.612-613.

T , horizon pour l'alternative "préservation"

π , représentation simplifiée de l'évolution du changement technique

i , taux d'actualisation et a_t , taux de croissance des bénéfices annuels associés à l'option "préservation".

La valeur de π dépend de l'investissement par unité de capacité thermique, du coût du kilowatt-heure de l'électricité thermique et aussi du taux de progrès dans l'efficacité technique. Sa valeur sera appréciée en fonction du taux de progrès technique annuel r . La valeur de a_t dépend à la fois du taux de croissance du consentement à payer (ry) et du taux de croissance de la quantité (∂). $a_t = ry + \partial$ (2)

L'évolution de la valeur du bénéfice associé à l'option "préservation" dépend d'un effet prix et d'un effet quantité.

L'augmentation de la population, par exemple, à préférences et revenus inchangés, va entraîner l'augmentation des quantités demandées d'un même pourcentage pour tout prix donné. D'un autre côté, pour toute quantité fixée, l'augmentation des revenus associée à l'élasticité de la demande pour l'activité de récréation entraîne un effet prix. Un changement dans les préférences va affecter à la fois les prix et les quantités. Par ailleurs, les auteurs considèrent qu'il existe une période k à partir de laquelle la limite de congestion du site est atteinte. En présence d'une trop forte demande pour l'activité de récréation, la limite serait dépassée et des externalités surviendraient. Une quantité de services de qualité constante est ainsi définie et sa valeur constituera la borne inférieure pour les bénéfices associés à la préservation.

Enfin, une période m est définie : elle correspond à l'année où ∂ et le taux de croissance de la population sont identiques.

Finalement, les bénéfices annuels ne progressent pas à un rythme constant dans le temps, ils dépendent des valeurs prises par ∂ , ry , k , π , m et i . C'est en prenant en compte l'ensemble de ces paramètres, que les auteurs parviennent à déterminer la valeur minimum de B_0^P qu'il faut obtenir de la préservation pour que ce bénéfice actualisé sur l'horizon compense celui associé à la construction du barrage. (voir tableau page suivante). Parmi un ensemble de valeurs possibles pour chaque paramètre, ce sont les valeurs suivantes qui sont retenues (1) :

(1) A.C. FISHER et al., opus cité, p.615.

TABLE 1—INITIAL YEAR'S PRESERVATION BENEFITS, b_0^p , (GROWING AT THE RATE α_1) REQUIRED IN ORDER TO HAVE PRESENT VALUE EQUAL TO DEVELOPMENT

r_y	$\gamma = 7.5$ Percent $k = 25$ years	$\gamma = 10$ Percent $k = 20$ years	$\gamma = 12.5$ Percent $k = 15$ years
	$i = 8$ Percent, $m = 50$ years,	$r = 0.04$,	$PVC_{1...T} = \$18,540,000$
0.04	\$138,276	\$109,149	\$106,613
0.05	87,568	70,363	70,731
0.06	48,143	39,674	41,292
	$i = 9$ Percent, $m = 50$ years,	$r = 0.04$,	$PVC_{1...T} = \$13,809,000$
0.04	\$147,422	\$115,008	\$109,691
0.05	101,447	80,122	78,336
0.06	64,300	51,700	52,210
	$i = 10$ Percent, $m = 50$ years,	$r = 0.04$,	$PVC_{1...T} = \$ 9,861,000$
0.04	\$142,335	\$110,240	\$103,030
0.05	103,626	80,888	77,232
0.06	71,369	56,597	55,194

Sources: Exhibit No. R-671, R-672, FPC hearings, and Transcript R-5869-5873.

Where:

i = discount rate

r_y = annual rate of growth in price for a given quantity

γ = annual rate of growth of quantity demanded at given price

k = number of years following initial year upon which carrying capacity constraint becomes effective

m = number of years after initial year upon which γ falls to rate of growth of population

$PVC_{1...T}$ = present value of development (adjusted)

r = annual rate of technological progress in the development case

$\delta = 10\%$; $r_y = 0,05$; $k = 20$ ans ; $m = 50$ ans ; $r = 0,04$; $i = 9\%$. Dans ces conditions, $B_0^p = \$ 80,122$.

En prenant en compte la valeur des services de récréation (activités de pêche et de chasse) procurés par le Hellis Canyon en l'état actuel de non-développement, les auteurs font néanmoins remarquer que les bénéfices associés à la préservation sont bien plus considérables : ils s'élèvent à \$900,000, ce qui représente trois fois plus que les bénéfices associés au développement hydro-électrique du site. Le bénéfice initial procuré par la préservation s'avère bien plus élevé qu'il ne le fallait pour observer une valeur au moins égale à celle des bénéfices résultant de l'option développement. (1)

Cependant, il apparaît difficile de prévoir l'évolution de l'ensemble des paramètres dont dépend la rentabilité des options en présence. L'estimation du taux de croissance des bénéfices

(1) A.C. FISHER et al., opus cité, p.616.

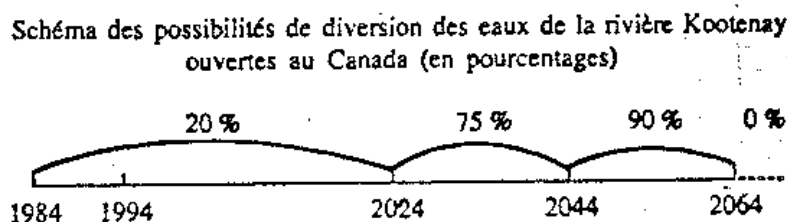
ces annuels associés à l'option "préservation" (a_t) doit être appréciée en fonction de l'évolution de la population, des préférences des individus, de la demande en services récréatifs.

Si l'estimation de tels bénéfices est déjà délicate pour la période présente, leur estimation dans le futur demeure beaucoup plus aléatoire. L'évaluation de la valeur de quasi-option dans un tel contexte est toujours possible mais s'appuie sur des données, des hypothèses et des paramètres dont l'évolution dans le temps, la structure fortement.

Les travaux de P. CRABBE expriment cette difficulté (1). Il s'agit d'estimer la valeur de quasi-option dans le cadre d'un projet d'aménagement d'un site à des fins hydro-électrique. Le site est la vallée du Kootenay située au Canada. La rivière Kootenay est un des affluents de la rivière Columbia qui traverse en amont le Canada et en aval les Etats-Unis.

Un traité d'aménagement de la rivière Columbia a été négocié entre le Canada et les Etats-Unis. Le Canada s'est engagé à ne pas construire de barrage sur le Kootenay alors que cette construction permettrait d'augmenter le débit d'un autre barrage et donc la production d'hydro-électricité.

Cependant, des possibilités de diversion des eaux du Kootenay ont été précisées dans le temps :



Compte tenu de ces informations, la vallée du Kootenay offre deux utilisations exclusives :

- une activité de récréation. Un tel développement est réversible.
- une activité de production hydro-électrique. Ce développement qui entraîne une diversion partielle de la rivière est considéré comme irréversible.

Les deux gouvernements sont supposés neutres à l'égard du risque.

(1) P. CRABBE, "Valeurs d'option et de quasi-option des ressources naturelles", in G. GAUDET, P. LASSERRE, *Ressources naturelles et théorie économique*, 1986, p.265-278.

Les rendements des deux investissements dépendent de la réalisation de deux événements :

R = demande relativement élevée de récréation et relativement basse d'électricité

H = demande relativement basse de récréation et relativement haute d'électricité

P. CRABBE prend en compte sur un horizon de trois périodes des valeurs associées aux bénéfices nets de chaque investissement en fonction des deux événements. Ces valeurs sont considérées comme arbitraires par l'auteur. Enfin, des probabilités conditionnelles formalisent l'acquisition d'information dans le temps. Un ensemble de valeurs est retenu.

Pour parvenir à une stratégie optimale, il est nécessaire de calculer les rendements de chaque investissement sur l'horizon considéré. Il faut alors prendre en compte un taux d'escompte ; le taux est supposé égal à environ 11 % de sorte que le facteur d'actualisation est : $\frac{1}{1+i} = 0,9$

$$\frac{1}{1+i}$$

Dans une première étape, les rendements totaux associés aux investissements sont ainsi calculés de manière récursive. Dans un second temps, ce sont les rendements totaux espérés maximaux qui sont évalués : c'est le calcul de "la valeur espérée de retarder l'engagement".

La valeur de quasi-option est définie par l'auteur comme la différence entre la valeur espérée de retarder l'engagement et le rendement total espéré d'un investissement irréversible. L'aboutissement de sa démarche présente une stratégie optimale sous la forme d'un arbre de décision contenant un ensemble de décisions optimales. Cependant, l'arbitraire demeure au sein de cette procédure d'optimisation. Il est présent dans l'estimation des bénéfices nets retirés des deux options associées à la réalisation d'un des événements. Il est présent dans la valeur des probabilités conditionnelles. De plus, l'évaluation des rendements dans le futur repose sur le recours à l'actualisation, procédure dont nous avons souligné les faiblesses.

Les enseignements que nous pouvons tirer de ces deux exemples d'évaluation sont les suivants. Il existe deux difficultés essentielles auxquelles se heurte la valeur de quasi-option : l'estimation correcte des bénéfices associés aux options en présence et l'application de l'actualisation. Dans un article récent, C. HENRY souligne comment la procédure d'arbitrage entre deux générations peut être biaisée par une mesure incorrecte des bénéfices associés à deux options incompatibles (1).

(1) C. HENRY, "Efficacité économique et impératifs éthiques : l'environnement en copropriété", *Revue économique*, n°2, mars 1990, vol.41, p.203-206.

L'application du principe de copropriété du milieu naturel qui permet de régler un problème d'arbitrage entre la génération présente et la génération future, peut être compromise. Ce principe traduit le fait qu'une génération ne peut priver d'un site naturel l'autre génération sauf à lui assurer une compensation suffisante. Les deux générations ont donc un droit égal à l'existence du milieu naturel.

Supposons qu'il existe une action visant à installer un équipement sur un site naturel (destruction du site) d'une part, et d'autre part, une action visant à préserver le site. C. HENRY considère que les bénéfices associés à la destruction du site à court terme sont surestimés tandis que ceux associés à la préservation du site à long terme sont sous-estimés. L'éloignement du temps dans ce dernier cas joue un rôle particulier ; notamment avec le taux d'actualisation.

Compte tenu de ces évaluations incorrectes, il effectue une correction qui consiste à utiliser un taux d'actualisation nul pour les bénéfices tirés de la préservation du site. Dans ce cas, les bénéfices associés à la préservation de la période de court terme sont égaux avec ceux de la période de long terme. Le long terme est donc préservé. Finalement, l'arbitrage s'exprime à travers les inéquations suivantes (1) :

hypothèse : $B(1,C) > B(2,C)$ et $B(1,L) < B(2,L)$

$$B(1,C) + \frac{1}{(1+r)} B(1,L) > B(2,C) + B(2,L)$$

avec $B(2,L) = B(2,C)$

Dans le cas où $B(p) > B(d)$, c'est l'option "préservation" qui est retenue.

Dans le cas où $B(p) < B(d)$, c'est l'option "destruction" qui est choisie. Par ailleurs, l'application du principe de copropriété implique un transfert (T) prélevé sur la première génération tel que : $B(1,C) - T > B(2,C)$ à la première période. Ce transfert sera versé à la seconde période à la deuxième génération est tel que : $(1+r)T + B(1,L) > B(2,L)$ et $B(2,C) = B(2,L)$.

(1) $B(1,C)$, $B(1,L)$: bénéfices nets retirés de l'option "destruction du site" à la première période et à la deuxième période.

$B(2,C)$, $B(2,L)$: bénéfices nets retirés de l'option "préservation" à la première période et à la deuxième période.

r est le taux d'actualisation.

Si l'évaluation du concept n'est pas chose aisée, il faut aussi reconnaître que la valeur d'option et la valeur de quasi-option n'expriment pas à elles seules la valeur totale des ressources naturelles. En effet, il existe deux autres valeurs attachées au non-usage : la valeur d'existence et la valeur de legs. La valeur d'existence est la disponibilité à payer pour l'existence d'une ressource naturelle, indépendamment de toute utilisation. Elle représente la satisfaction de savoir d'un élément naturel est préservé.

Le fondement de cette valeur est le risque d'irréversibilité inhérent à la disparition définitive du site ou d'une espèce menacée (1). Qu'un usage futur existe ou n'existe pas, l'existence des éléments naturels est toujours valorisée. La valeur de legs est le consentement à payer pour la satisfaction de transmettre aux générations futures un élément naturel. Elle représente la satisfaction associée à cette transmission.

La prise en compte de ces différentes valeurs de non usage ont conduit D.W. PEARCE et R.K. TURNER à définir le notion de valeur économique totale des ressources naturelles. (2) Elle se décompose en trois composantes : la valeur de consommation (ou valeur d'usage actuelle), la valeur d'option et la valeur d'existence. La valeur d'existence contient implicitement la valeur de legs : la préservation des éléments de la nature -contenue dans la valeur d'existence- autorise une transmission du patrimoine naturel aux générations futures.

La valeur économique totale constitue pour les auteurs une mesure des bénéfices associés à l'option préservation d'un espace naturel. Ainsi, pour que le développement du site soit réalisé, on doit vérifier la relation suivante :

$$B_d - C_d + C_p > B_p \quad (1)$$

où $B_p = VET = PO + VEX$ avec $PO = E(SC) + VO$

La règle de décision en matière de développement s'écrit donc :

$$B_d - C_d + C_p > PO + VEX \quad (2)$$

(1) B. DESAIGUES, P.POINT, "Les méthodes de détermination d'indicateurs de valeur ayant la dimension de prix pour les composantes du patrimoine naturel", *Revue économique*, vol. 41, n°2, mars 1990, p.290.

(2) D.W. PEARCE, R.K.TURNER, *Economics of natural resources and the environment*, 1990, p.129-135.

Avec :

B_d , bénéfices associés au développement

B_p , bénéfices associés à la préservation

C_d , coûts associés au développement

C_p , coûts associés à la préservation

PO, prix d'option

VEX, valeur d'existence

$E(SC)$, espérance du surplus du consommateur. c'est le surplus escompté d'une utilisation de l'espace naturel dans sa forme préservée.

VO, valeur d'option associée à la préservation (>0)

Il s'avère cependant difficile de mesurer correctement la valeur d'existence et le prix d'option. Dans la détermination de la VET des "wetlands", les auteurs ne quantifient pas les valeurs d'existence et de legs mais, au regard des apports d'études sur les ressources environnementales, précisent que ces valeurs sont positives et significatives. (1)

Plusieurs méthodes d'évaluation permettent de déterminer les bénéfices liés à l'usage d'une ressource (par exemple les services de récréation) et ceux liés au non-usage.(2) L'évaluation contingente permet d'évaluer le consentement à payer pour bénéficier de l'amélioration ou de la préservation de la qualité d'un élément naturel, ou la compensation pour supporter la dégradation de cet élément. Cette méthode est utilisée pour la détermination du prix d'option et de la valeur d'existence ainsi que pour l'estimation des bénéfices de récréation. Dans leurs travaux, D.A. GREENLEY, R.G. WALSH et R.A. YOUNG ont mesuré à l'aide de cette méthode la valeur d'option ainsi que les autres valeurs de préservation (legs, existence) associées à la qualité de l'eau. Ils montrent que ces valeurs doivent être ajoutées au surplus du consommateur associé à l'utilisation de l'environnement naturel (activités de récréation basés sur l'utilisation de l'eau) afin de dé-

(1) D.W. PEARCE, R.K.TURNER, opus cité, p.324. Les "wetlands" sont définis comme l'ensemble des marais, marécages...

(2) Pour un examen approfondi de ces méthodes se reporter à : B. DESAIGUES, P.POINT, "L'économie du patrimoine naturel : quelques développements récents", *Revue d'économie politique*, 6, nov-déc. 1990, p.733-744.

terminer le bénéfice total des aménités procurées par l'environnement. (1)

A ses côtés, deux autres approches sont employées pour l'évaluation des bénéfices liés à l'usage. La méthode des coûts de transports, qui repose sur le consentement à payer pour se rendre sur un site, est utilisée pour évaluer les bénéfices de récréation (parcs, lacs). La méthode des prix hédonistiques ou hédonistes, elle, permet d'étudier la différence de prix des habitations associée à une modification de la qualité de l'air par exemple. Elle est aussi très utilisée en matière de pollutions atmosphériques et de bruit. Le prix est dans cette approche fonction d'un ensemble d'attributs. Parmi l'ensemble des méthodes, seule la méthode d'évaluation contingente permet d'évaluer les valeurs de non-utilisation.

Les résultats auxquels conduisent l'emploi de ces trois méthodes demeurent très différents. PEARCE et TURNER ont comparé les résultats obtenus par plusieurs études selon la méthode retenue et montré une grande divergence dans les estimations.(2)

Chez KRUTILLA (1967), le concept de valeur d'option exprimait les valeurs d'existence et de legs attachées aux bénéfices de la préservation (3). Là encore les difficultés résident dans l'évaluation de ces concepts qui repose sur le consentement à payer. S. FAUCHEUX et J.F NOEL font remarquer qu'une telle évaluation ne peut être effectuée correctement dans le cas des pollutions globales (4); trop d'éléments échappent au calcul individuel ce qui implique une "fausse" évaluation monétaire des dommages.

De son côté, R.PASSET considère que ces valeurs de non-usage des ressources naturelles peuvent être infinies. Les services vitaux (ensemble des fonctions régulatrices assurées au sein des cycles biogéochimiques) - expression de la qualité de l'environnement - ont une valeur d'existence, une valeur de legs et une valeur d'option infinies (5).

Lorsqu'on considère les ressources énergétiques et les choix que l'on peut formuler compte tenu de l'effet d'irréversibilité et de la présence d'incertitudes, ces choix n'expriment que la

(1) D.A. GREENLEY, R.C. WALSH, R.A.YOUNG, "Option value : empirical evidence from a case study of recreation and water quality", *The quarterly journal of economics*, vol. XCVI, november 1981, n°4, p.657-673.

(2) D.W. PEARCE, R.K.TURNER, opus cité, p.152, p.331.

(3) J.V. KRUTILLA, "Conservation reconsidered", *American economic review*, vol.LVII, n°4, sept. 1967, p.780-81.

(4) S. FAUCHEUX, J-F NOEL, *Les menaces globales sur l'environnement*, La découverte, 1990, p.85.

(5) R. PASSET, "Les approches économiques de l'environnement", *Les Cahiers Français*, n°250, mars-avril 1991, p.49

valeur de quasi-option associée à l'option flexible (report de la décision dans le temps avec croissance de l'information) sans se préoccuper explicitement des valeurs de legs et d'existence des ressources énergétiques.

Nous considérons que de telles valeurs, non révélées par le marché ni par l'expression de la valeur de quasi-option, trouvent leur origine au sein du principe de conservation dont la portée est universelle et dépasse la vision monétarisable du système énergétique.

Nous pensons que ce sont des valeurs qui relèvent d'un autre paradigme où les relations entre éléments vivants - ici l'homme - et les éléments inanimés - ici les ressources énergétiques - sont des relations dynamiques à la base desquelles des principes ou lois de nature non économique agissent et orientent leur évolution.

Pour comprendre la place des concepts économiques relativement au monde réel qu'ils souhaitent appréhender, nous allons proposer une nouvelle approche du système énergétique et de la biosphère au regard des apports fondamentaux d'une science physique particulière : la thermodynamique.

Conclusion du chapitre

Le principe de conservation accorde implicitement aux ressources énergétiques une valeur non marchande, valeur exprimée à travers le concept de valeur d'option, mais aussi, et de manière plus précise, à travers ceux de valeur de legs et de valeur d'existence.

Autrement dit, un signal de marché ne peut être un facteur de régulation satisfaisant dans le cadre d'une allocation intergénérationnelle des ressources. Seul un principe éthique, dont la mise en application reste à faire, est apte à gérer les ressources de manière à respecter la pérennité du patrimoine énergétique. Celui-ci n'est donc plus considéré comme un bien que seules les générations présentes pourraient exploiter mais comme un bien de l'humanité dont toute dépréciation menacerait directement les générations présentes et futures.

CONCLUSION DE LA PREMIERE PARTIE

Compte tenu des incertitudes nombreuses sur l'évolution à long terme des perturbations de la biosphère, une stratégie de flexibilité basée sur le principe de conservation peut constituer une voie opportune. Afin de sortir de l'état d'intertie dans lequel se trouve le système énergétique, il nous apparaît important de le rendre plus flexible en effectuant des choix technologiques qui ne referment pas le champ des futurs possibles. Comme les prix ne peuvent rendre compte de la dépréciation du patrimoine énergétique générée par les activités humaines, le recours à un principe éthique tel que le principe de conservation est essentiel. Seul un tel principe peut assurer une harmonie entre le développement des sociétés et celui des éléments de la biosphère.

DEUXIEME PARTIE : DYNAMIQUE DU SYSTEME ENERGETIQUE, LOIS D'EVOLUTION ET EMERGENCE D'UNE NOUVELLE STRUCTURE FLEXIBILISEE

INTRODUCTION

Après avoir étudié le fonctionnement du système énergétique à travers ses effets sur la biosphère, il nous apparaît essentiel de s'interroger sur les lois qui orientent son évolution afin d'en tirer quelques principes pour les générations futures. Ces lois ne relèvent pas de la sphère économique mais de la sphère physique. Les principes de la thermodynamique s'appliquent au système énergétique et celui-ci ne peut s'y soustraire. Son fonctionnement et sa structure sont guidés par ces principes qui l'orientent irréversiblement vers un état d'entropie maximale. Enfin, nous pouvons comprendre "ce que fait" le système énergétique : c'est un système ouvert sur la biosphère et il maintient sa structure par un apport continu de basse entropie de l'environnement. Conjointement, cet état structuré se réalise au détriment de l'environnement dont l'entropie croît.

Les ressources énergétiques ne sont donc pas des ressources quelconques : du point de vue de la thermodynamique, elles sont de basse entropie. Deux conséquences en découlent : la valeur économique a pour fondement la basse entropie et celle-ci est l'expression de la rareté absolue.

Avec les principes thermodynamiques, l'intégration des principes écologiques va nous permettre de considérer le rôle des interdépendances évolutives exprimé à travers le concept de coévolution. La biosphère et le système énergétique peuvent alors évoluer en harmonie. La coévolution va s'appuyer sur le principe de conservation et aussi sur le principe de stabilité qui ne peut être assuré que par une grande diversité au sein du système. Ainsi pour parvenir à un système énergétique soutenable, il est primordial de lui conférer une plus grande stabilité en le dotant d'un potentiel technologique diversifié.

La maîtrise de l'évolution entropique est possible si des technologies efficaces et des substitutions interénergétiques sont mises en oeuvre. L'exploitation du gisement potentiel de maîtrise énergétique peut ainsi apporter une réponse satisfaisante. Elle s'intègre dans un changement de la structure du système énergétique où une place majeure est accordée aux ressources renouvelables.

Nous verrons qu'il est nécessaire de mettre en oeuvre des moyens de régulation destinés à favoriser l'émergence d'un système soutenable. Finalement, la recherche d'une transition flexible constitue une priorité qui ouvre la voie d'une révolution de la conscience humaine avec la naissance du paradigme planétaire.

PREMIERE SOUS-PARTIE :

UNE NOUVELLE APPROCHE DU SYSTEME ENERGETIQUE ET DE
LA BIOSPHERE : L'INTEGRATION DES PRINCIPES THERMODY-
NAMIQUE ET LEURS IMPLICATIONS FONDAMENTALES

"Une nature qui se tient relativement stable hors de son état d'équilibre, un processus de régénération périodique mathématiquement réglé, des lois et des limites naturelles qui nous sont maintenant connues pour l'essentiel, un aboutissement complexe en l'homme responsable, ce sont là des actions matérialisées qui émanent d'une volonté absolue pour un destin spirituel, librement choisi, de l'humanité"

J.A. TERNISIEN, L'absolu, ses réalités humaines.

CHAPITRE 5 : FONDEMENTS ET PRINCIPES DE LA THERMODYNAMIQUE

Introduction

Longtemps considérées au sein d'un paradigme conservatif, les ressources énergétiques étaient appréhendées par le système économique comme des biens quelconques détachés de toute relation avec l'environnement naturel qui les contient. Cette conception erronée de la réalité sera à l'origine des effets néfastes de l'exploitation des ressources sur la biosphère comme de leur dilapidation outrancière au nom d'un développement économique nécessaire.

Une rupture totale va survenir avec les apports d'une science physique particulière : la thermodynamique. Ses enseignements permettent d'englober dans une unité totale les phénomènes appartenant à des univers auparavant disjoints tels la chimie, la biologie, l'écologie et l'économie. Grâce aux principes de la thermodynamique, le patrimoine énergétique peut être apprécié sous un nouveau jour : il appartient à un paradigme physique évolutif orienté par la loi d'entropie. Sa valeur est intrinsèquement liée à la basse entropie de la matière et de l'énergie qui le constituent. Le concept d'entropie et ses implications, à l'origine d'une approche nouvelle de la rareté et de la valeur des ressources, est donc un concept fondateur de l'enracinement biophysique du système économique en général et du système énergétique en particulier.

Section 1 - Une rupture majeure dans l'évolution des sciences

§ 1 Origine, principes et évolution de la thermodynamique

La thermodynamique est une branche de la physique qui est née au 19^{ème} siècle avec les travaux de Sadi Carnot sur la puissance motrice du feu (1). C'est, selon Jean A. TERNISIEN, "la partie de la physique qui a pour objet l'étude des transformations qui s'accomplissent dans la matière inerte ou vivante, en particulier lorsqu'elle est affectée par des échanges de températures et des conversions d'énergie, d'une forme à une autre" (2). La thermodynamique s'intéresse ainsi aux transformations de l'énergie et aux échanges d'énergie - aux flux -. Des lois ou principes régissant ces transformations ont pu être établis.

Mais avant d'étudier les principes de la thermodynamique (3) et leurs conséquences, nous allons analyser l'émergence de cette discipline. Afin de saisir l'ampleur de la rupture dans les sciences physiques que constitue les développements de la thermodynamique du 19^{ème} siècle et leurs prolongements au 20^{ème} siècle, il nous semble alors utile de reconsidérer le monde de la physique antérieur où règne la mécanique classique.

Le point de départ que nous présentons ici se situe avec les lois de NEWTON sur le mouvement des corps (4). La physique newtonienne traite non seulement de la description du mouvement mais aussi de l'accélération subie par les différents points d'un corps d'instant en instant. L'étude de l'accélération revient à déterminer les différentes forces agissant sur les points d'un système matériel.

NEWTON traduit l'équivalence entre force et accélération par la relation : $F = m.a$ (5). Il y a égalité en chaque instant entre la force "F" appliquée en un point et l'accélération "a" qu'elle engendre proportionnelle à la masse "m". Afin de donner une description dynamique d'un système matériel, deux types de données empiriques doivent être retenus pour un système de points : la description des positions et des vitesses de chacun des points en

(1) S. CARNOT, *Réflexions sur la puissance motrice du feu et sur les machines propres à développer cette puissance*, 1824.

(2) J.A. TERNISIEN, *L'absolu, ses réalités humaines*, 1989, p.72.

(3) Seuls deux principes seront étudiés ici. Il existe deux autres principes : l'un stipule que l'on peut définir la température d'un corps (principe zéro), l'autre traite des propriétés de la matière à très basse température (postulat de Nernst-Planck).

(4) I. PRIGOGINE, I. STENGERS, *La nouvelle alliance*, Gallimard, 1979, p.99.

(5) C'est l'expression des lois du mouvement.

un instant donné - instant initial (1)- et la nature des forces dynamiques.

A propos de ce second point, la science Newtonienne a découvert la loi universelle de la gravitation : il n'existe qu'une seule force, la force de gravitation, qui détermine le mouvement des planètes et la chute des corps sur la terre. Ainsi, quelque soient deux corps, le système newtonien implique qu'une force d'attraction les attire l'un vers l'autre, proportionnellement au produit de leurs masses. Les enseignements que l'on peut tirer de NEWTON sont les suivants.

La dynamique newtonienne s'appuie sur le déterminisme et la réversibilité des trajectoires. Le déterminisme s'exprime à travers le système dynamique : le système dynamique se définit par le fait que le mouvement de chacun de ses points est déterminé par la position et la vitesse de l'ensemble des points qui le constituent, en chaque instant. Le calcul d'une trajectoire s'effectue en prenant en compte la loi du mouvement et en retenant un état instantané du système, "état initial" quelconque.

De cet état initial est déduite la succession des états qui traversent le système. Dès que la loi générale d'évolution dynamique est connue, n'importe quel état particulier suffit pour déterminer aussi bien l'évolution passée jusqu'à cet état que l'évolution à venir. La loi détermine alors complètement le système et permet de déduire son évolution et de calculer n'importe quel état. La dynamique et ses trajectoires déterministes décrivent un univers statique : "tout est donné" (2) avec la donnée initiale. La réversibilité de la trajectoire dynamique s'appuie sur le fait que la dynamique considère comme équivalentes du point de vue mathématique les transformations $t \rightarrow -t$, l'inversion du sens de l'écoulement du temps, et $v \rightarrow -v$, le renversement des vitesses. A tout moment, il est donc possible d'inverser une évolution dynamique particulière et retrouver ainsi une situation identique à la situation initiale.

Au début du 19^{ème} siècle, les travaux de NEWTON fondent le socle unificateur des sciences en plaçant le concept de "force" au centre de la physique. L'ensemble des phénomènes physico-chimiques est réduit à l'action des forces.

La conception newtonienne de l'univers et le modèle dynamique des trajectoires éternelles, réversibles et déterministes qui l'accompagne vont largement inspirer le monde scientifique

(1) L'instant initial : c'est à partir de lui que la succession des états sera décrite par des équations dynamique (équations différentielles). La succession des états constitue un ensemble de trajectoires ponctuelles.

(2) Expression de Bergson.

et à travers lui, l'École de LAPLACE. LAPLACE écrit en 1814 :

"Nous devons envisager l'état présent de l'univers comme l'effet de son état antérieur et comme la cause de celui qui va suivre. Une intelligence qui, pour un instant donné, connaîtrait toutes les forces dont la nature est animée et la situation respective des êtres qui la composent, si d'ailleurs elle était assez vaste pour soumettre ces données à l'analyse, embrasserait dans la même formule les mouvements des grands corps de l'univers et ceux du plus léger atome : rien ne serait incertain pour elle, et l'avenir comme le passé, serait présent à ses yeux" (1).

Selon lui, il suffit de connaître la position et la vitesse de toutes les particules de l'univers pour à un instant donné en déduire l'évolution antérieure. L'univers est déterministe et donc prévisible. Le déterminisme de LAPLACE englobe tous les niveaux de la matière. Il s'agit là d'une conception globale et cohérente d'un monde conservatif et éternel.

De NEWTON jusqu'au début du 19^{ème} siècle, c'est le règne de la dynamique classique. Il se traduit par l'adoption de principes ou lois régissant l'évolution des systèmes matériels, ces principes s'appliquant dans un paradigme particulier. Parmi les principes de la dynamique, nous nous intéressons ici au principe de la conservation de l'énergie, c'est à dire conservation de la somme des énergies potentielle et cinétique. Dans un monde sans choc ni frottement, monde idéalisé, le mouvement d'un pendule oscille autour de sa position d'équilibre indéfiniment. Une certaine quantité d'énergie potentielle lui est conférée. Il se produit un mouvement correspondant à une quantité égale d'énergie cinétique.

L'énergie potentielle (ou "potentiel") dépend des positions relatives des points matériels. Elle permet aussi de décrire les forces qui s'appliquent en ces points et en chaque instant. L'évolution dynamique d'un système isolé conserve donc l'énergie de ce système (2). Une nouvelle fonction va être introduite : c'est la fonction hamiltonienne H qui exprime la somme des énergies potentielles et cinétiques en termes de 2 variables canoniques q , la position et p , le moment ($p = m.dq/dt$) (3).

(1) Laplace, cité dans R. PASSET, "Prévision à long terme et mutation des systèmes économiques", *Revue d'économie politique*, n°5, 1987, p.535.

(2) Trois concepts centraux relatifs au premier principe : masse, position et vitesse. L'énergie cinétique concerne la vitesse et l'énergie potentielle la position. L'énergie mécanique totale (cinétique + potentielle) est constante tout comme la masse.

(3) I. PRIGOGINE, I. STENGERS, opus cité, p.119-122.

Cette fonction constitue la loi du mouvement du système étudié. Le hamiltonien engendre l'évolution des variables canoniques tout en se conservant lui-même au cours de ce mouvement. L'évolution dynamique modifie l'importance respective des deux énergies. Le hamiltonien contient aussi les propriétés de toute évolution dynamique : réversibilité des équations canoniques (il y a équivalence mathématique entre le renversement du temps et celui des vitesses), propriété de conservation (le hamiltonien est conservé par l'évolution qu'il détermine dans le temps), compensation à tout instant entre la variation de l'énergie potentielle et celle de l'énergie cinétique.

L'énergie joue un rôle essentiel dans la dynamique classique. Le principe de conservation de la somme des énergies potentielle et cinétique va prendre une place prépondérante au cours du 19^{ème} siècle, tandis que l'énergie devient le concept unificateur de la physique et supplante le concept de force. Ce principe est paradoxal : il constitue un des principes de la thermodynamique issu des apports de la dynamique classique. Pourtant, au début du 19^{ème} siècle, des expériences traduisent l'idée suivante : le mouvement ne produit pas que des modifications de la disposition spatiale des corps - autrement dit des changements de la valeur de l'énergie potentielle - comme le traduisait l'évolution dynamique. Les réactions chimiques peuvent produire de l'électricité (pile chimique de Volta) et inversement (l'électrolyse). Le mouvement est donc à l'origine de phénomènes particuliers que les scientifiques peuvent observer lors d'expériences en laboratoire.

Dans les années 1840, quelques scientifiques mettent en évidence la conservation d'une grandeur physique - qui sera identifiée comme "énergie" plus tard - à travers les transformations que subissent les systèmes physiques, chimiques et biologiques (1). Il faut mentionner ici l'apport particulier de Joule qui a trouvé un principe général unificateur et explicatif des phénomènes auxquels s'intéressaient les scientifiques (l'électricité, l'électrochimie et les phénomènes où intervenaient la chaleur et la mécanique) (2). Au sein de tous les phénomènes étudiés, le postulat est le suivant :

"quelque chose" se conserve en quantité et change de forme qualitative.

En 1847, JOULE va définir les rapports entre les formes qualitatives au moyen d'un équivalent général des transformations physico-chimiques : c'est le principe de l'équivalence du

(1) A ce propos, on peut se référer à l'ouvrage de P. MIROWSKI, *More heat than light*, Cambridge university press, 1989, p.35-49.

(2) La connexion entre les disciplines scientifiques (chimie, biologie, science de la chaleur...) s'interprète comme une conversion qui généralise ce qui se produit au cours des mouvements mécaniques. D'après I. PRIGOGINE, opus cité.

travail et de la chaleur, principe qui permet de mesurer la grandeur physique qui se conserve, à savoir l'énergie.

La première équivalence est établie en mesurant le travail mécanique nécessaire pour élever d'un degré la température d'une quantité donnée d'eau. Le concept d'énergie est indissociable de celui du principe de conservation. Au milieu du 19^{ème} siècle, la physique n'est plus considérée comme la science des forces mais la science de l'énergie. Alors que les forces apparaissent et disparaissent, l'énergie, elle, demeure. Elle est indestructible. Les phénomènes physico-chimiques sont abordés par le concept d'énergie et expliqués par le principe d'équivalence de JOULE. Le principe de conservation de l'énergie va permettre d'unifier la nature toute entière pour les physiciens. JOULE écrit en 1884 :

"En effet les phénomènes naturels qu'ils soient mécaniques, chimiques ou vitaux, consistent presque exclusivement en une conversion de l'attraction à travers l'espace de la force vive (énergie cinétique) et de la chaleur les uns dans les autres. Et c'est ainsi que l'ordre de l'univers est maintenu - rien n'est perturbé, rien n'est jamais perdu, mais la machinerie tout entière, si compliquée qu'elle soit, fonctionne avec calme et harmonie"(1).

Au delà de la complexité des choses, complexité résultant de la diversité des causes, effets ou conversions, le principe de conservation de l'énergie préserve une régularité parfaite. Le principe de conservation de l'énergie "découvert simultanément" par quelques scientifiques est un premier point de rupture dans l'histoire de la physique. D'autres points de ruptures existent. Aussi, avant ce premier principe, les contours d'un second principe ont constitué un changement majeur dans la nature et la conception de l'évolution des systèmes matériels. Le point de départ est constitué par la formulation de la loi de conduction de la chaleur que FOURIER établit en 1811. La loi s'exprime ainsi :

"le flux de chaleur entre deux corps est proportionnel au gradient de température entre ces deux corps". Le gradient est identifié comme la force qui détermine le flux thermique.

Cette loi est aussi générale que les lois newtoniennes sur le mouvement. La propagation de la chaleur entre deux corps de températures différentes est un phénomène que l'on ne peut ramener aux interactions dynamiques entre masses voisines. La propagation de la chaleur tend toujours vers une distribution homogène des températures dans le corps où

(1) Cité dans I. PRIGOGINE, I. STENGERS, opus cité, p.174.

elle se produit. Aux côtés de l'équilibre dynamique entre forces, va s'ajouter l'équilibre thermique.

Cette loi va ainsi décrire ce processus spontané sans donner le moyen de le contrôler. Elle décrit un gaspillage irrémédiable notamment quand il s'agit d'utiliser la chaleur pour faire fonctionner un moteur. Il y a donc une rupture avec la dynamique classique qui considérait la réversibilité du temps (équivalence entre les deux directions du temps). L'introduction de la notion de processus irréversible en physique s'effectue avec la loi de FOURIER. C'est le début d'une véritable "révolution scientifique" qui commence.

En 1824, Sadi CARNOT publie ses "réflexions sur la puissance motrice du feu et sur les machines propres à développer cette puissance" à partir desquelles le second principe de la thermodynamique va être élaboré. Sa théorie de la chaleur demeure toujours vraie bien que le concept de base sur laquelle elle repose, le calorique ne soit pas juste. Son étude des machines thermiques se fonde sur l'hypothèse suivante : la quantité de chaleur se conserve. La chaleur identifiée à un fluide dépourvu de masse, "le calorique", est conservée, à travers les transformations qu'elle provoque.

L'intérêt de ses travaux réside dans l'analyse d'une machine thermique (machine qui transforme de la chaleur en travail) idéale qui évite toute mise en contact de corps de températures différents. C'est donc une machine thermique qui aura le meilleur rendement possible, le rendement idéal. Le cycle idéal de CARNOT se réalise ainsi : un transport global de chaleur va s'effectuer entre deux sources de températures différentes sans aucun flux direct de chaleur et sans que les corps de températures différents entre en contact (1). Compte tenu de la loi de FOURIER, le cycle de CARNOT peut apparaître comme un moyen de maîtriser la conduction irréversible.

Soit T_0 , la température de la source froide

Soit T_1 , la température de la source chaude

Le principe de CARNOT s'écrit : $R_t = 1 - \frac{T_0}{T_1} = \frac{T_1 - T_0}{T_1}$ avec $T_0 < T_1$

$$T_1 \quad T_1$$

(1) A propos des étapes du cycle de Carnot : P.W. ATKINS, *Chaleur et désordre, le deuxième principe de la thermodynamique*, 1987, Pour la science, p.23-26.

$R_t < 1$, il exprime la quantité maximale de chaleur transformable en travail.

Le rendement est toujours inférieur à 1. C'est une limite supérieure du rendement. Ce résultat est fondamental. Il traduit le fait qu'il existe des pertes entraînant un rendement qui n'est pas quelconque mais toujours inférieur à 1. Il est nul quand la machine est en relation avec la seule source froide : au contact de la source froide, le système perd de la chaleur. Pourtant, toute machine doit disposer d'une source froide : elle joue un rôle essentiel. C'est grâce à elle que l'énergie "s'écoule" de la source chaude à la source froide tout en se conservant. C'est aussi elle qui permet de récupérer l'énergie sous forme de travail physique (force motrice) (1). Mais lors du cycle, l'absorption d'énergie par la source froide traduit le fait que la totalité de la chaleur ne peut être transformée en travail. Il y a dissipation de l'énergie. La transformation partielle de la chaleur, forme dégradée de l'énergie, en travail tient à la nature des choses : un corps chaud se refroidit spontanément.

S. CARNOT a identifié le phénomène universel de la propagation de la chaleur comme l'origine des pertes de puissance des moteurs thermiques se traduisant par la diminution de leur rendement. La loi de FOURIER est ainsi associée à la description des pertes par conduction.

Les travaux de CARNOT vont être repris par des physiciens et faire apparaître la thermodynamique dans toute sa splendeur. William THOMSON (ou Lord KELVIN) va approfondir la question de la dissipation de l'énergie que CARNOT n'avait fait que constater et la transformer en une affirmation. Sa démarche n'est pas seulement une approche du monde laplacien, monde à l'image de la machine idéale, éternel et conservatif. Son approche cosmologique englobe deux universalités : la propagation irréversible de la chaleur et la conservation de l'énergie.

Le monde qu'il décrit est une grande machine où la conversion de la chaleur en mouvement ne peut se faire qu'au prix d'un gaspillage irréversible d'une dissipation d'une certaine quantité de chaleur. Il traduit l'évolution du monde vers un état final défini par FOURIER, l'état d'équilibre thermique où aucune différence ne subsiste et donc ne peut produire un effet. THOMSON réconcilie les travaux de JOULE et de CARNOT. JOULE avait réfuté l'hypothèse de conservation de la chaleur, l'hypothèse de base de CARNOT.

(1) Le travail mécanique produit a un coût qui s'exprime par un flux de chaleur qui diminue la différence de température des 2 sources. Le travail et la diminution de la différence de température sont idéalement reliés par une équivalence réversible : en fonctionnant à l'envers, la machine peut restaurer la différence initiale tout en consommant le travail produit.

Le second principe de la thermodynamique est né. Il est expliqué à travers une formulation particulière par THOMSON : conservation de l'énergie, science des moteurs et loi de conduction de FOURIER.

En 1865, Rudolf CLAUSIUS élabore un nouveau langage autour du concept d'entropie, langage qui permet de comprendre la problématique dont est née la thermodynamique. Il établit la loi de croissance irréversible de l'entropie. Il s'agit en fait de la dissociation de deux concepts fondamentaux, concepts qui traduisaient les contradictions entre les théories de JOULE et de CARNOT : la conservation et la réversibilité. Tandis que au sein des transformations mécaniques, les principes de conservation et de réversibilité coïncident, au sein des transformations physico-chimiques, l'énergie peut être conservée mais ne peut être renversée (c'est le cas de la diffusion de chaleur décrite par FOURIER).

Le point de départ est une interprétation particulière du cycle de CARNOT pour les moteurs thermiques. La nécessité de deux sources, l'une chaude et l'autre froide, traduit le fait qu'un processus de compensation (refroidissement au contact de la source froide) est nécessaire à celui de la conversion de la chaleur en travail pour retrouver l'état thermique et mécanique initial. Lorsque les flux de chaleur entre les sources et la conversion de la chaleur se compensent, l'état initial est retrouvé (relation d'équivalence de CARNOT). CLAUSIUS va définir une "fonction d'état" du système moteur, fonction qui va décrire l'état du système. Elle dépend de la pression, du volume, de la température et de la quantité de chaleur dans le système.

Afin de caractériser le passage entre deux états du système, CLAUSIUS distingue les flux "utiles", flux qui compensent une conversion au cours du cycle et les flux "dissipés", flux perdus qu'une inversion du fonctionnement du système ne pourrait ramener à la source chaude. Ces flux dissipés traduisent bien le concept d'irréversibilité qui s'applique à tout système physico-chimique. La fonction d'état notée "S" appelée entropie caractérise l'état du système. Après chaque cycle, l'entropie reprend sa valeur initiale.

La variation d'entropie, dS , se décompose en deux termes aux propriétés différentes : $d_e S$ décrit le flux d'entropie entre le milieu et le système. Il décrit l'ensemble des transformations du système déterminées par les flux d'échange avec le milieu ; ces transformations peuvent être annulées par une inversion des flux (réversibilité). $d_i S$ décrit les transformations à l'intérieur du système.

Si $d_i S$ est positif, elles sont irréversibles : au sein du cycle de CARNOT une inversion du sens de fonctionnement du système ne peut ramener les flux à la source chaude. Une inversion des échanges avec le milieu ne peut affecter son signe. Si $d_i S$ est nul, les transformations sont réversibles.

La propriété du terme $d_e S$ est d'être indépendante de la direction du temps ; son signe ne dépend que du sens des échanges avec le milieu. Au contraire, le terme $d_i S$ traduit soit la croissance de l'entropie au cours du temps, soit une entropie constante.

CLAUSIUS considère des systèmes isolés qui n'échangent ni matière, ni énergie avec le milieu. Par définition, le flux d'entropie est nul. Seule la production d'entropie $d_i S$ existe. La croissance de l'entropie représente une évolution spontanée du système. Elle ne restera constante que dans le cas particulier où il n'existe que des transformations réversibles dans le système. Mais dès qu'une transformation irréversible - dissipation de l'énergie - est subie par le système, alors l'entropie augmente.

L'entropie est considérée comme un indicateur de l'évolution du système. Elle exprime l'existence d'une flèche du temps pour tout système isolé en physique. Les processus irréversibles vont se traduire par une augmentation de l'entropie jusqu'à un maximum au sein de systèmes isolés. L'état d'équilibre est caractérisé par une production d'entropie nulle.

Le second principe de la thermodynamique est un point de rupture essentiel avec le monde de la dynamique : alors qu'avant le système évoluait sur une trajectoire donnée que les conditions initiales déterminaient, l'ensemble des systèmes en état de non équilibre évoluent vers le même état d'équilibre (entropie maximum). L'équilibre étant atteint, le système a oublié les conditions initiales. Le 19^{ème} siècle est celui de la thermodynamique classique ou thermodynamique d'équilibre fondée sur l'étude de systèmes fermés (1) au sein desquels des processus irréversibles ont lieu. Les apports de CARNOT, KELVIN et CLAUSIUS ont ainsi constitué une avancée majeure dans la compréhension des phénomènes physiques.

Une autre avancée remarquable eut lieu à la fin du siècle avec les travaux de Ludwig BOLTZMANN. Il a découvert le lien entre les propriétés macroscopiques de la matière et le

(1) Systèmes qui échangent de l'énergie mais pas de la matière.

comportement des constituants microscopiques de la matière (atomes et molécules). Les propriétés macroscopiques de la matière ont été analysées par la thermodynamique de KELVIN et CLAUSIUS. BOLTZMANN tente de comprendre les relations entre les deux niveaux de la matière en s'intéressant aux comportements des constituants microscopiques de la matière. Les propriétés macroscopiques résultent de l'action conjuguée de l'ensemble des atomes. C'est donc au niveau des interactions entre les atomes qu'il va focaliser son attention.

Le concept de probabilité est alors introduit en physique en tant que principe explicatif du comportement d'un système formé d'une population de particules élémentaires. L'évolution d'un système composé d'un grand nombre de particules conduit à un seul état probable : celui de l'équi-répartition, et cela quelque soit la répartition initiale des particules (1).

Le principe d'ordre de BOLTZMANN implique que cet état le plus probable est celui où les événements qui se produisent (passages des particules d'un compartiment à un autre) compensent statistiquement leurs effets (à chaque instant, il passe une moyenne autant de particules dans une direction que dans l'autre). Cet état met un terme à l'évolution macroscopique du système, évolution irréversible.

BOLTZMANN décrit l'entropie comme un état attracteur. Cet état correspondant à la plus grande probabilité vers lequel un système thermodynamique isolé va s'orienter spontanément.

Considérant une situation initiale avec un gaz concentré, quand il se répand dans un récipient isolé entre ses deux compartiments, les molécules de gaz vont se déplacer jusqu'à ce que leur répartition soit uniforme (mouvement vers le déstructuré). Les passages des particules sont expliqués par les probabilités (chocs aléatoires des molécules). Ce mouvement orienté fournit un travail (énergie cinétique). Quand toute différence de densité (2) du gaz a

(1) L'application du concept de probabilité en physique :

Soit une population de N particules dans une boîte scindée en 2 compartiments. Le problème est de connaître la probabilité des différentes répartitions possibles des éléments dans les 2 compartiments. Soit N_1 , nombre de particules dans le compartiment 1 et N_2 celui relatif au compartiment

$$2. N_2 = N - N_1$$

Pour des N très grands (de l'ordre de 10^{23}), on a une majorité de répartitions particulières qui réalisent la répartition : $N_1 = N_2 = N/2$. (d'après la loi des grands nombres)

(2) une différence de densité s'explique par une différence de température.

disparu, le mouvement désordonné ne produit plus de travail. Le système est au repos : la quantité de gaz s'est conservée mais elle a changé de forme : elle s'est dégradée.

BOLTZMANN interprète la croissance irréversible de l'entropie du système comme l'expression de la croissance du désordre moléculaire, l'effet des collisions donnent un sens à la croissance de l'entropie ainsi qu'à l'irréversibilité.

Il établit une relation mathématique entre l'entropie et le désordre :

$$S = k \log W$$

W s'exprime comme le nombre d'arrangements différents, ou nombre de façon de réaliser une répartition particulière (complexions), k, facteur de proportionnalité est une constante universelle appelée constante de BOLTZMANN. Elle est égale à $3,3 \times 10^{24}$ calories par degré Celsius.

"L'importante formule de BOLTZMANN fait de l'évolution thermodynamique irréversible, une évolution vers des états de probabilité croissante et de l'état attracteur, l'état macroscopique réalisé par la presque totalité des états microscopiques dans lesquels peut se trouver le système" (1). L'interprétation probabiliste de BOLTZMANN se réfère à un modèle microscopique (2) de l'évolution irréversible d'une population de particules vers un état d'équilibre. L'équilibre thermique correspond au maximum d'entropie du système isolé. L'état le plus probable correspond à une répartition uniforme de l'énergie.

L'entropie, dans sa signification statistique est une mesure du désordre du système qui y règne à l'échelle moléculaire. BOLTZMANN a apporté un changement majeur à la thermodynamique classique : il introduit le concept de probabilité et détermine l'entropie comme une probabilité thermodynamique. Il fournit ainsi une interprétation scientifique du hasard (3) C'est la naissance de la mécanique statistique. Au déterminisme mécanique, il oppose le rôle du hasard avec la notion de probabilité. Au 19ème siècle, la thermodynamique d'équilibre va apporter une réponse à la complexité de la nature en terme de dissipation de l'énergie, d'oubli des conditions initiales et d'évolution vers le désordre. Elle a opposé à la dynamique une vision différente du monde où l'irréversibilité du temps conduit à la mort thermique de l'univers.

(1) I. PRIGOGINE, I. STENGERS, opus cité, p.195.

(2) L. BOLTZMANN et le théorème H (1872) : se reporter à I. PRIGOGINE et I. STENGERS, opus cité, p.273-276.

(3) D. RUELLLE, Hasard et chaos, Ed. O; Jacob, 1991.

Cependant la thermodynamique d'équilibre, si elle a apporté une réponse satisfaisante en ce qui concerne les phénomènes physico-chimiques, elle ne permet pas d'interpréter certains phénomènes de structuration que nous pouvons rencontrer dans la nature. Ainsi, les modèles de la thermodynamique d'équilibre ne permettent pas d'étudier la nature vivante : une cellule vit de son ouverture, se nourrit de flux de matière et d'énergie provenant de l'extérieur : dès que le lien avec le milieu est rompu, le phénomène de structuration disparaît. Un pas va être franchi au début du 20ème siècle avec la considération de systèmes ouverts, échangeant avec le milieu extérieur matière et énergie. C'est le début de la thermodynamique de non-équilibre.

En 1931, Lars ONSAGER découvre la première relation générale appartenant à la thermodynamique de non-équilibre. Il établit les relations de réciprocité. Ces relations montrent que lorsqu'un processus irréversible k est influencé par la force thermodynamique X_h (L_{kh} différent de 0 : coefficients phénoménologiques décrivant le couplage des deux processus h et k), le processus irréversible h est aussi influencé par la force X_k (L_{hk} différent de 0). Les deux effets s'expriment à travers les coefficients phénoménologiques et le théorème d'ONSAGER établit que : $L_{hk} = L_{kh}$ (1).

Les relations d'ONSAGER ont un caractère général. Leur domaine de validité est linéaire. Proche de l'équilibre où les forces thermodynamiques sont faibles, le flux J_k est une fonction linéaire de la force :

$$J_k = \sum_h L_{kh} X_h$$

L_{kh} différent de 0 décrit le couplage de deux processus irréversibles k et h . X_h est la force.

La thermodynamique linéaire du déséquilibre s'intéresse aux systèmes ouverts qui évoluent vers l'équilibre sans l'atteindre. Ce sont des systèmes où les flux provenant de l'exté-

(1) Deux processus irréversibles: soit h , un processus de diffusion thermique et soit k un processus de conduction de chaleur. L_{hk} est lié à la diffusion thermique qui consiste en l'apparition d'un gradient de concentration dans un mélange initialement homogène sous l'influence d'un gradient de température. L_{kh} est lié au flux de chaleur entraîné par le gradient de concentration avec un même coefficient de proportionnalité à travers le mélange.

rieur peuvent perpétuer une différence de potentiel (ou densité). Dans le cas d'un gaz qui circule entre deux compartiments d'un récipient, si un compartiment est chauffé, la différence de température maintient alors une différence de densité. La différence de densité qui prévalait initialement du fait de la concentration du gaz est maintenue par un apport extérieur de chaleur.

Proche de l'équilibre, un système ouvert peut maintenir sa structure dans le temps. Au sein d'un tel système, la production d'entropie ($d_j s$) n'est pas nulle pour autant. L'étude des travaux d'ONSAGER va être approfondie et dépassée afin d'expliquer la dissociation des concepts d'entropie et de désordre et dépasser le paradoxe suivant : l'apparition de forces naturelles organisées et la tendance physique à la dégradation.

C'est I. PRIGOGINE qui va franchir le pas décisif. En 1945, il établit le théorème de production minimale d'entropie. C'est une première étape qui sera la source de recherches fécondes dans le domaine de la non-linéarité qui fera ici l'objet d'un développement particulier. Le théorème traduit l'intérêt porté par PRIGOGINE sur l'étude de l'évolution dans le temps de la production d'entropie.

Il exprime que, dans le domaine linéaire, domaine où les relations d'ONSAGER sont valides, la production d'entropie tend toujours à diminuer spontanément. Le système évolue alors vers un état stationnaire caractérisé par la production d'entropie minimale. Cette production est compatible avec les contraintes imposées aux systèmes qui sont constitués par les conditions aux limites. A l'état stationnaire, l'activité du système augmente l'entropie du milieu de la valeur minimale compatible avec les conditions aux limites. Les conditions imposées peuvent être une différence de température entre deux points du système, ou encore la valeur de concentrations en produits initial et final à l'extérieur. L'état stationnaire de non-équilibre est donc différent des états d'équilibre pour lesquels la production d'entropie est nulle. Il est cependant toujours caractérisé par la même fonction potentielle : l'entropie.

La thermodynamique linéaire tout comme la thermodynamique d'équilibre permet la définition d'un potentiel thermodynamique. Cela implique que l'évolution vers l'état stationnaire simplifie l'oubli des conditions initiales, comme nous l'avons constaté pour l'évolution vers l'état d'équilibre (1). L'existence d'un extremum déterminé par la fonction potentielle assure la stabilité de l'état attracteur, qu'il soit un état stationnaire ou un état d'équilibre.

(1) I. PRIGOGINE, I. STENGERS, opus cité, p.211.

PRIGOGINE va alors s'intéresser aux systèmes pour lesquels la stabilité des états attracteurs n'est plus assurée. C'est le cas pour des systèmes loin de l'équilibre au sein desquels la production d'entropie ne permet plus de définir un état attracteur, élément stable de l'évolution irréversible des systèmes. On entre alors dans le domaine du non-linéaire ; les flux ne sont plus des fonctions linéaires des forces. C'est la naissance de la thermodynamique non linéaire des processus irréversibles (1). PRIGOGINE montre comment un apport d'énergie suffisamment important peut éloigner des systèmes physico-chimiques de l'équilibre et nourrir des systèmes d'auto-organisation spontanée, des ruptures de symétrie ou encore des processus de complexification. C'est le cas dans le domaine de l'hydrodynamique ou de l'écoulement des fluides.

Le système n'a plus pour attribut la stabilité car certaines fluctuations au lieu de régresser, s'amplifient et envahissent tout le système (2). Le système est instable et va, sous l'effet des fluctuations, évoluer vers un nouveau régime de fonctionnement. L'instabilité de BENARD constitue un exemple où l'instabilité de l'état stationnaire va déterminer un phénomène d'auto-organisation spontanée. Un nouveau régime de fonctionnement va se produire à une distance déterminée de l'équilibre.

L'expérience peut être décrite simplement. Une mince couche de liquide est soumise à une différence de température. La surface inférieure est chauffée tandis que la surface supérieure est en contact avec l'extérieur. Les conditions aux limites déterminent ainsi un flux permanent de chaleur du bas vers le haut.

A partir d'une valeur seuil du gradient (différence de température), le transport de chaleur par diffusion est accompagné d'un transport par convection. Le phénomène de convection, de mouvement cohérent des molécules prend place et accélère le transport de chaleur. Il se forment des structures hexagonales, "tourbillons de BENARD", liées à la production d'entropie du système. Ces réorganisations de la matière accroissent la dissipation. Avant le seuil d'instabilité, l'état stationnaire correspondait à l'équilibre décrit par BOLTZMANN. Cependant, au delà du seuil, une fluctuation - un courant microscopique de convection - ne va pas régresser comme le principe d'ordre de BOLTZMANN l'exigerait, mais s'amplifier jusqu'à devenir un courant macroscopique. Un nouvel ordre moléculaire apparaît au sein du système que le flux d'énergie avec l'extérieur stabilise. Loin de l'équilibre, le principe

(1) I. PRIGOGINE, *Introduction à la thermodynamique des processus irréversibles*, Dunod, 1968, p.103-146.

(2) Le phénomène de nucléation se manifeste dans une région du système et croît au sein du système tout entier. Plus un système est complexe et plus il y a de chances pour que certaines fluctuations jouent un rôle de structuration. D'après J.A. TERNISIEN, opus cité, p.64.

d'ordre de BOLTZMANN ne s'applique plus. La probabilité d'un tel phénomène d'auto-organisation est presque nulle.

PRIGOGINE définit les structures dissipatives (1) qui expriment le rôle constructif de l'irréversibilité comme des structures qui manifestent une activité cohérente de la matière. L'activité de production d'entropie n'est plus synonyme de nivellement des différences, de dégradation, de désordre. Les structures dissipatives associent l'idée d'ordre et l'idée de gaspillage, de dépense d'énergie.

"La dissipation d'énergie et de matière - généralement associée aux idées de perte de rendement et d'évolution vers le désordre - devient, loin de l'équilibre, source d'ordre ; la dissipation est à l'origine de ce qu'on peut bien appeler de nouveaux états de la matière" (2).

Loin de l'équilibre, les processus irréversibles tels que les structures dissipatives traduisent une certaine autonomie du système. Leur existence est un phénomène général. Le paradigme des structures dissipatives bouleverse totalement la conception de notre planète : elle est un système ouvert qui reçoit le flux d'énergie solaire dont une partie (non rayonnée par la terre) permet d'entretenir l'évolution de plus en plus complexe de la vie. On comprend que le vivant existe loin de l'équilibre, là où les processus producteurs d'entropie, les structures dissipatives jouent un rôle constructif et sont source d'ordre (3).

Les structures dissipatives constituent un attracteur pour le système. Issues de l'instabilité de l'état stationnaire et de l'amplification d'une fluctuation jusqu'à un niveau macroscopique, leur comportement est prévisible et stable par rapport aux fluctuations (dans le domaine des valeurs caractérisant les flux qui nourrissent ces structures) (4).

(1) Les structures dissipatives se situent au niveau de l'organisation super-moléculaire. On les rencontre en chimie ainsi qu'en biologie. Aux côtés des tourbillons de Bénard, mentionnons les structures de Turing découvertes en 1952. D'après *Pour la science*, novembre 1990, p.10-13.

(2) I. PRIGOGINE, I. STENGERS, opus cité p.216.

(3) I. PRIGOGINE, I. STENGERS, opus cité, p.263.

(4) Un autre type d'attracteur existe. Il s'agit de l'attracteur étrange qui lui ne permet pas de prévoir de comportement régulier et stable du système. L'attracteur étrange, ou encore attracteur "fractal" i.e. de dimension fractionnaire (non entière), est très sensible à de petites variations de ses paramètres (sensibilité aux conditions initiales). Ainsi, une petite variation peut entraîner des effets importants et déplacer le système d'un état à un autre très différent. Pourtant, les équations qui déterminent ces attracteurs sont parfaitement déterministes. De tels attracteurs caractérisent des systèmes chaotiques, systèmes errant d'état et état sans fin. Il s'agit là d'un chaos déterministe.

Références conseillées :

- I. PRIGOGINE, I. STENGERS, *Entre le temps et l'éternité*, Fayard, 1988.
- P-G DE GENNES et al., *L'ordre du chaos*, Pour la science, Belin, 1989.

Les lois macroscopiques universelles sont celles qui décrivent l'évolution vers le désordre, vers les états stationnaires proches de l'équilibre. Loin de l'équilibre, le rôle joué par quelques fluctuations microscopiques est essentiel.

La thermodynamique classique et ses prolongements aux domaines proches de l'équilibre a subi une transformation radicale : c'est le monde des processus non linéaires loin de l'équilibre qu'elle peut appréhender avec les apports majeurs de PRIGOGINE. C'est le monde de la destruction créatrice où le temps irréversible est créateur.

L'évolution d'un système loin de l'équilibre, "l'ordre par fluctuations", contient l'aléatoire constitué par le hasard des fluctuations et le déterminisme inhérent à l'existence de points de bifurcation. Le point critique à partir duquel un nouvel état devient possible est appelé bifurcation par PRIGOGINE (1). Ces points critiques sont des points d'instabilité autour desquels une perturbation infinitésimale suffit à déterminer le fonctionnement du système dans sa totalité. Après le point de bifurcation, le système devient instable et peut évoluer vers plusieurs régimes de fonctionnement stables (2).

La thermodynamique non linéaire traduit l'ouverture des systèmes matériels et l'abandon de la restriction sévère où les seuls systèmes artificiellement coupés du monde étaient retenus. La thermodynamique devient avec la thermodynamique des processus irréversibles une science physique évolutive. Elle établit la suprématie du modèle biologique sur le modèle mécanique dans l'étude des systèmes physico-chimiques, la compréhension de leur fonctionnement et de leur évolution irréversible.

Cette discipline scientifique dans ses développements interactifs et successifs s'est progressivement élargie dans son champ d'action afin de prendre en compte des phénomènes complexes de structuration et de dissipation. Elle a permis de révéler le rôle essentiel de l'ouverture des systèmes matériels et fournir une explication originale de la dégradation entropique de notre univers.

Nous allons à présent aborder cette question en étudiant les correspondances fondamentales entre la thermodynamique et d'autres disciplines n'appartenant pas à la physique. Les implications des principes de la thermodynamique sont fondamentales et concernent autant la biologie, l'écologie ou l'économie. Il apparaît inéluctable d'en saisir leur portée afin de proposer une nouvelle approche du système énergétique, approche construite sur la base d'une connaissance pluridisciplinaire essentielle pour délimiter les véritables contours du système.

(1) I. PRIGOGINE, I. STENGERS, opus cité, p.229.

(2) I. PRIGOGINE, I. STENGERS, *Entre le temps et l'éternité*, Fayard, 1988, p.61-64.

**LA THERMODYNAMIQUE - ORIGINE ET DEVELOPPEMENTS -
Tableau récapitulatif**

DOMAINE DE LA PHYSIQUE	RAPPORT A LA NATURE	NATURE DU PARADIGME	PRINCIPE D'EVOLUTION
<p>DYNAMIQUE CLASSIQUE :</p> <p>Fondements : travaux de NEWTON (18e siècle) loi universelle de la gravitation $F = ma$ mécanique classique</p>	<ul style="list-style-type: none"> - la nature est entièrement déterminée par son passé - la nature est étrangère à l'homme qui la décrit - l'"ordre de la nature" impose sa loi à l'homme 	<ul style="list-style-type: none"> - conservatif, éternel et Immuable (mirage du monde Laplacien) - univers stationnaire entièrement déterministe - Image du pendule : Il revient au repos quelle que soit la perturbation - son état d'équilibre est un attracteur - réversibilité du temps et équivalence entre les 2 directions du temps (aucune différence entre l'avant et l'après) 	<ul style="list-style-type: none"> - principe de conservation de l'énergie - le système dynamique évolue sur une trajectoire donnée et garde le souvenir de son point de départ puisque les conditions initiales déterminent la trajectoire une lois pour toutes - la dynamique est la science des trajectoires déterministes et réversibles
<p>THERMODYNAMIQUE CLASSIQUE OU D'EQUILIBRE : (19e siècle)</p> <p>Fondements :</p> <ul style="list-style-type: none"> - 1811 : loi de conduction de la chaleur de FOURIER - 1824 : le principe de Carnot - 1847 : équivalence du travail et de la chaleur, Joule - 1865 : Clausius définit l'entropie - Fin 19e siècle : BOLTZMANN : naissance de la mécanique statistique avec le concept de probabilité - rôle du hasard qui s'oppose au déterminisme mécanique - définition du principe d'ordre - l'entropie et le désordre sont liés : $S = k \cdot \log W$ - interprétation probabiliste 	<ul style="list-style-type: none"> - la nature n'est pas contrôlable - les systèmes physico-chimiques sont isolés - ils n'échangent ni matière ni énergie avec le milieu 	<ul style="list-style-type: none"> - évolutif : croissance de l'entropie ($dS/dT > 0$) - à l'équilibre, la production d'entropie est nulle ($dS/dT = 0$) flux et forces sont nuls aussi - l'état d'équilibre caractérisé par un maximum d'entropie est un état attracteur stable - univers de dégradation, de l'évolution vers un état d'équilibre défini par l'uniformité, le nivellement des différences - irréversibilité du temps 	<ul style="list-style-type: none"> - loi d'entropie, dissipation de l'énergie - l'évolution vers l'état d'équilibre signifie l'oubli des conditions initiales - irréversibilité : la flèche du temps est introduite --> évolution vers le désordre - le principe de conservation de l'énergie est présent - les fluctuations sont constamment ramenées à la moyenne dont elles ne peuvent s'écarter que d'une distance correspondant à la racine carrée du nombre des entités représentées
<p>THERMODYNAMIQUE DE NON EQUILIBRE : (20e siècle)</p> <p>Fondements :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Dissociation de la croissance de l'entropie et du désordre - 1931 : relations de réciprocité d'ONSAGER domaine de validité linéaire proximité de l'équilibre - 1945 : théorème de production minimale d'entropie de PRIGOGINE - 1962 : thermodynamique non linéaire des processus irréversibles de PRIGOGINE, loin de l'équilibre 	<ul style="list-style-type: none"> - l'homme se situe dans le monde qu'il décrit - systèmes ouverts (échange de matière et d'énergie) 	<ul style="list-style-type: none"> - l'état stationnaire de non-équilibre se caractérise par la production d'entropie minimale compatible avec les contraintes imposées au système (conditions aux limites) la production d'entropie n'est donc pas nulle ($dS/dT > 0$) - la thermodynamique linéaire décrit des comportements stables, prévisibles des systèmes qui tendent vers le taux minimal d'activité compatible avec les flux qui le nourrissent 	<ul style="list-style-type: none"> - près de l'équilibre, les lois d'évolution sont linéaires (flux : fonction linéaire de la force) - l'évolution vers l'état stationnaire signifie l'oubli des conditions initiales
	<ul style="list-style-type: none"> - systèmes ouverts 	<ul style="list-style-type: none"> - paradigme de structures dissipatives : association de l'idée d'ordre et de l'idée de gaspillage (structures de non équilibre) - la dissipation est à l'origine de nouveaux états de la matière (nucéation avec rôle de fluctuations "dangereuses") - ces structures vivent de leur ouverture, se maintiennent donc aussi longtemps que le flux extérieur est maintenu - loin de l'équilibre, l'état stationnaire est instable - ces structures accroissent la dissipation d'énergie. Leur comportement est prévisible et stable par rapport aux fluctuations. 	<ul style="list-style-type: none"> - loin de l'équilibre, les flux ne sont plus des fonctions linéaires des forces : les lois d'évolution sont non linéaires - l'ordre par fluctuations est la loi d'évolution (rôle du hasard) - les flux traversant certains systèmes physico-chimiques et les éloignant de l'équilibre peuvent nourrir des phénomènes d'auto-organisation spontanée, des ruptures de symétrie, des évolutions vers une complexité et une diversité croissantes. - rôle constructif de l'irréversibilité - bifurcations du système (points critiques instables)

§ 2 - La thermodynamique et les sciences humaines

L'objet de cette étude est de saisir les enseignements de la thermodynamique au regard de la compréhension d'autres disciplines. L'existence de relations fondamentales entre cette discipline physique et les sciences humaines se traduit du niveau microscopique au niveau macroscopique. Le fondement de telles relations réside dans le caractère anthropomorphique de la thermodynamique. L'homme par sa pensée et par son action modifie le milieu dans lequel il évolue. Il a compris un certain nombre de principes régissant la transformation de l'énergie et de la matière, les deux constituantes de l'univers qui le dépasse et l'englobe. La thermodynamique s'adresse à l'individu en tant que structure biologique, être vivant organisé et aux éléments composant son milieu, qu'ils soient vivants ou inanimés. Elle transcende une même réalité composée de différents niveaux d'organisation de la matière et de l'énergie en fournissant des lois universelles.

Rien ne saurait échapper à ses lois : de l'atome au cosmos, du vivant à l'inanimé, leur évolution est orchestrée par la dissipation, la dégradation entropique. L'homme, élément fini dans l'infini, infiniment grand et infiniment petit, appartient à une totalité. Cette totalité que constitue l'univers, va être abordée notamment par la biologie, l'écologie à différents niveaux de désagrégation. Des systèmes biologiques et écologiques vont être définis avec des caractéristiques particulières. Nous ne pensons pas que de telles caractéristiques constituent des analogies, des similitudes purement superficielles, des images avec celles rencontrées dans les systèmes thermodynamiques. Au contraire, nous adoptons le concept d'homologie tel que le définit Ludwig Von BERTALANFFY, pour définir les caractéristiques des systèmes (1). Sur le plan formel, les lois sont les mêmes. Par contre, les facteurs qui agissent sur les systèmes sont différents. Une correspondance formelle existe dans la réalité : elle est traduite par l'existence d'homologies entre les caractéristiques des systèmes.

D'autres disciplines ont été "éclairées" par les apports de la thermodynamique : nous parlerons notamment de l'économie. Enfin, à travers les lois de la thermodynamique, nous tenterons de rapprocher des domaines de recherche souvent cloisonnés. Ces rapprochements mettront en évidence les correspondances entre les principes qui gouvernent le comporte-

(1) L. VON BERTALANFFY, *Théorie générale des systèmes*, Dunod, 1973, p.82-83.

L'identité des lois permet de représenter des phénomènes distincts par des modèles similaires. Elle rend possible l'isomorphisme entre les sciences.

ment des différents éléments des systèmes. L'évolution de la thermodynamique apparaîtra comme une science unificatrice, qui dépasse ses contradictions propres sous l'effet d'une généralisation : de nombreux concepts de cette discipline physique vont s'appliquer à des niveaux non physiques.

"Telle est la promesse de cohérence que nous lisons dans le devenir de la physique. Non pas une unité qui nous permettrait de comprendre le "sujet" et "l'objet" dans les mêmes termes, de ramener l'évolution biologique, voire sociale, aux catégories de la physico-chimie, mais la possibilité d'une articulation positive entre les sciences, de questions qui ne les referment pas sur leur spécificité, mais les ouvrent à la possibilité de questions auxquelles les autres sciences sont confrontées" (1).

L'éclairage apporté par la thermodynamique sur des disciplines non physiques est apparue avec ses développements consécutifs au 19ème siècle et 20ème siècle. Plus particulièrement, la généralisation du second principe à des systèmes physico-chimiques ouverts constitue un premier rapprochement entre la biologie et la thermodynamique. Tant que le principe de CARNOT ne concernait que l'évolution d'un système fermé, la biologie entraînait en conflit avec la thermodynamique. Tout être vivant existe du fait qu'il échange matière et énergie avec le milieu dans lequel il vit. La thermodynamique entre en conflit avec l'évolution des espèces. La théorie de DARWIN vient contredire apparemment le second principe qui traduit la dégradation et la croissance de l'entropie. L'opposition sera plus marquée encore avec les apports de BOLTZMANN sur l'évolution irréversible vers le désordre et le nivellement de toutes les différences.

La loi de dissipation en physique est en contradiction totale avec la loi d'évolution en biologie. Le monde vivant dans son évolution se traduit par le passage vers un ordre plus élevé : il devient de plus en plus complexe, structuré (organisé) et hétérogène. La contradiction disparaît dès qu'on se réfère à un système ouvert. Tous les processus irréversibles se caractérisent par une production d'entropie croissante. Dans des systèmes fermés, elle croît et donc l'ordre est sans cesse détruit. Par contre, dans des systèmes ouverts, non seulement il y a production d'entropie mais aussi une importation d'entropie, un flux provenant de l'extérieur. Ce flux est négatif dans le cas d'un organisme vivant.

Des systèmes vivants peuvent éviter l'accroissement d'entropie et évoluer vers des états de plus en plus ordonnés et organisés. La fonction d'entropie étendue de PRIGOGINE l'expli-

(1) I. PRIGOGINE, I. STENGERS, *Entre le temps et l'éternité*, Fayard, 1988, p.66.

que (1).

Le physicien E. SCHRODINGER, en 1945, avait déjà expliqué la différence fondamentale entre systèmes vivants et systèmes non vivants ou inanimés avec la thermodynamique du vivant. L'organisme vivant retarde la venue du moment où son entropie est maximum -la mort - en se nourrissant d'entropie "négative"(2). C'est le fondement de la tendance non entropique des organismes vivants. Les processus observables dans les êtres vivants se déroulent conformément au second principe de la thermodynamique (3).

La thermodynamique des processus irréversibles de PRIGOGINE a permis de réconcilier évolution physique et évolution biologique : l'ouverture du système, quelque soit sa nature, fait des lois de la thermodynamique et de son second principe, une généralité. C'est un premier résultat fondamental.

Le comportement d'auto-organisation de la matière (structure dissipative) se produit loin de l'équilibre thermodynamique d'un système ouvert de nature physico-chimique. "La vie n'est donc que l'aventure de la matière parvenue à un certain niveau de complexité" (4). Les structures dissipatives vivent de leur ouverture, de l'apport d'énergie de l'extérieur. La cellule vivante est l'exemple d'une telle structure, source d'un processus de complexification de la matière vivante.

Discipline de la biologie, l'écologie (5) va bénéficier d'un enrichissement considérable du point de vue de la compréhension des mécanismes régulateurs des écosystèmes. Le concept d'écosystème est créé en 1935 par A.G. TANSLEY. Il est pensé comme un ensemble composé d'une biocénose et d'un biotope.

(1) Dans un système ouvert, la variation totale d'entropie s'écrit : $dS = d_iS + d_eS$, où d_eS est la variation d'entropie par apport (échange d'entropie avec le milieu) et d_iS est la variation d'entropie due à des processus irréversibles à l'intérieur du système.

Le second principe implique $d_iS > 0$, d_eS peut être positif ou négatif. Si on considère une cellule vivante, elle maintient sa structure en se nourrissant de l'énergie du milieu ; $d_eS < 0$ car il y a "importation" d'énergie dans le système.

(2) P. ASCOT, *Histoire de l'écologie*, PUF, 1988, p.140.

(3) Pour un approfondissement des implications de la thermodynamique aux systèmes en biologie se référer à : J. TONNELAT, *Thermodynamique et biologie*, 2 volumes, Maloine Editeur, 1977/1978

(4) R. PASSET, *L'économique et le vivant*, Payot, 1979, p.103.

(5) C'est le biologiste allemand E. HAECKEL qui invente en 1866 le mot "écologie".

(6) Se reporter au chapitre 2.

C'est P. LINDEMAN qui en 1942 redéfinit l'écosystème comme une totalité : "les analyses des cycles de relations trophiques indiquent qu'une communauté biotique ne peut être clairement différenciée de son environnement abiotique : l'écosystème doit être dès lors considéré comme l'unité écologique la plus fondamentale" (1). Son approche de nature systémique est tout à fait nouvelle. Il établit une loi, loi qui porte son nom, relative aux transferts d'énergies dans les écosystèmes : c'est une implication directe du second principe de la thermodynamique.

La loi s'énonce ainsi : seule une fraction de l'énergie qui pénètre à un niveau trophique donné dans une communauté est transmise au niveau trophique supérieur. Le transfert d'énergie d'une partie de l'écosystème à une autre n'est donc pas total. Les échanges d'énergie à différents niveaux des chaînes alimentaires traduisent des pertes dans le rendement des conversions (2). C'est les débuts de l'analyse énergétique.

Les travaux de LINDEMAN sont à l'origine de deux avancées majeures : l'une concerne la thermodynamique du vivant de E. SCHRODINGER déjà mentionnée et l'autre est relative à la cybernétique dont le père fondateur est N. WIENER. Il est intéressant de noter que ces deux contributions vont avoir des implications en écologie. La thermodynamique du vivant de SCHRODINGER et son fondement avec des organismes vivants luttant contre l'entropie et vivants de leur ouverture va constituer le point de départ de nouveaux travaux relatifs aux écosystèmes.

En 1953, les frères ODUM vont utiliser pour la première fois le langage de la thermodynamique afin de déduire les caractéristiques des écosystèmes. L'écosystème se comporte sur le plan thermodynamique comme un organisme vivant : c'est un système ouvert et il vit de son ouverture sur le milieu. "Les organismes vivants, les écosystèmes et la biosphère toute entière, possèdent la caractéristique thermodynamique essentielle d'être capables de créer et de maintenir un état d'ordre interne, de basse entropie ..." (3). Les lois de transfert de l'énergie ont des implications importantes en écologie : la productivité, les chaînes alimentaires ou les structures trophiques en résultent directement.

Les différentes manifestations de la vie sont accompagnées de transformations énergétiques, sans que l'énergie puisse être ni créée ni détruite (premier principe). L'état d'organisa-

(1) R.L. LINDEMAN, cité dans P. ASCOT, opus cité, p.129.

(2) F. RAMADE, Ecologie des ressources naturelles, Masson, 1981, p.12.

(3) E.P. ODUM, H.T. ODUM, cité dans P. ASCOT, opus cité, p.140.

tion dans lequel se maintiennent aussi bien les organismes que les écosystèmes provient des transferts d'énergie avec le milieu.

Un flux fondamental est le flux solaire qui conditionne toute production de matière vivante. C'est de lui que dépend l'activité photo-synthétique. Ce flux s'écoule de manière univoque au travers des différentes composantes de la biosphère. Les transferts d'énergie entre différents niveaux trophiques qui sont décrits au niveau des chaînes alimentaires révèlent l'efficacité des processus de conversion énergétique. L'efficacité de la photosynthèse est le rapport entre la production nette et l'énergie lumineuse totale : elle est de l'ordre de 0,1 à 1%.

Les frères ODUM ont montré dans leurs travaux que l'efficacité écologique (1) du niveau des producteurs diminuait quand on considérait des niveaux trophiques de plus en plus éloignés de celui-ci. De l'énergie potentielle est perdue à chaque transfert de la chaîne alimentaire :

- premier niveau trophique : les plantes vertes
- second niveau : les herbivores
- troisième niveau : les carnivores primaires
- quatrième niveau : les carnivores secondaires

Le pourcentage d'énergie transférée correspond au pourcentage d'énergie consommée pour un niveau trophique donné.

TABLE 1. EFFICIENCY OF ENERGY TRANSFER AT VARIOUS TROPHIC LEVELS IN TWO LAKE ECOSYSTEMS.

Trophic Level	Efficiency of Energy Transfer (Per cent)	
	Cedar Bog Lake, Minnesota ¹	Lake Mendota, Wisconsin ²
Photosynthetic plants (producers)	0.10	0.40
Herbivores (primary consumers)	13.3	8.7
Small carnivores (secondary consumers)	22.3	5.5
Large carnivores (tertiary consumers)	not present	13.0

¹ After Lindeman (1941, 1942).

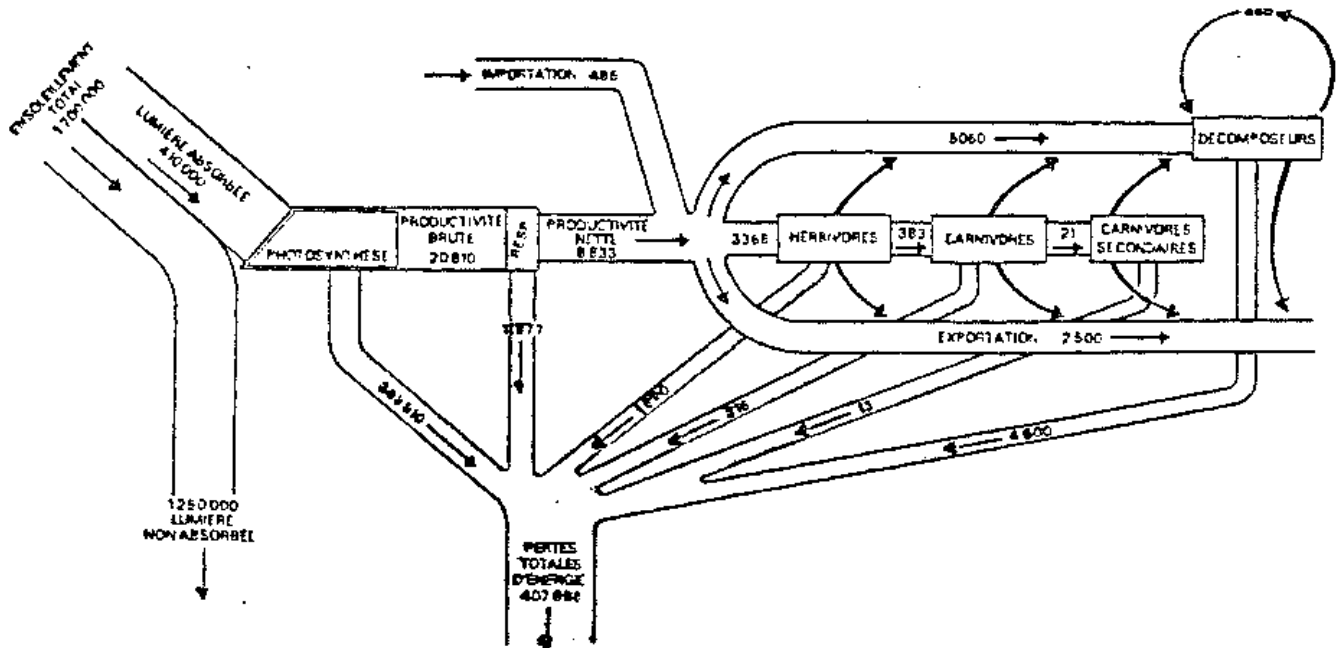
² Based on Juday (1940).

E.P ODUM, fundamentals of ecology, Sanders, 1954

Généralement, quatre niveaux trophiques sont considérés. Un très faible pourcentage de

(1) L'efficacité écologique se définit comme le rapport entre la quantité d'énergie assimilée dans un niveau trophique de rang n et la quantité d'énergie assimilée dans un niveau trophique de rang (n-1). D'après J.A. TERNISIEN et al., *Dictionnaire usuel de l'environnement et de l'écologie*, Guy le Prat, 1981.

l'énergie disponible du soleil est fixée par les plantes. L'efficacité du transfert est élevée pour les animaux ; l'animal est en effet un bon convertisseur énergétique. L'énergie est dissipée irréversiblement en chaleur. Les flux d'énergie circulant dans les écosystèmes unidirectionnellement, l'énergie se dégrade et se disperse au fur et à mesure dans l'environnement. Le schéma des transferts d'énergie dans l'écosystème des Silver Springs met bien en évidence l'importante déperdition d'énergie tout au long du passage d'un niveau trophique à l'autre. C'est l'expression de la loi d'entropie.



Transferts d'énergie dans les Silver Springs, en kcal/m²/an.
En hachures, pertes dues à la respiration et par les végétaux
sous la forme de chaleur (Odum, 1957).

D'après R.PASSET, l'économique et le vivant, Payot, 1979

Entre les différents niveaux trophiques, l'efficacité écologique est de l'ordre de 10%. Ces 10% se réfèrent à la fraction d'énergie effectivement assimilée par les niveaux.

Au niveau de la planète, l'énergie solaire reçue chaque année par la terre s'élève à 5.10^{20}

kcal ; $1,4 \cdot 10^{20}$ kcal pour les continents et $3,6 \cdot 10^{20}$ kcal pour les océans. E.P. ODUM et H.T. ODUM ont réalisé une synthèse à l'échelle de la biosphère des diverses valeurs de la productivité primaire (1) selon les écosystèmes retenus. Cette évaluation est un élément majeur de la quantification des flux d'énergie et donc de l'établissement des bilans énergétiques de la biosphère.

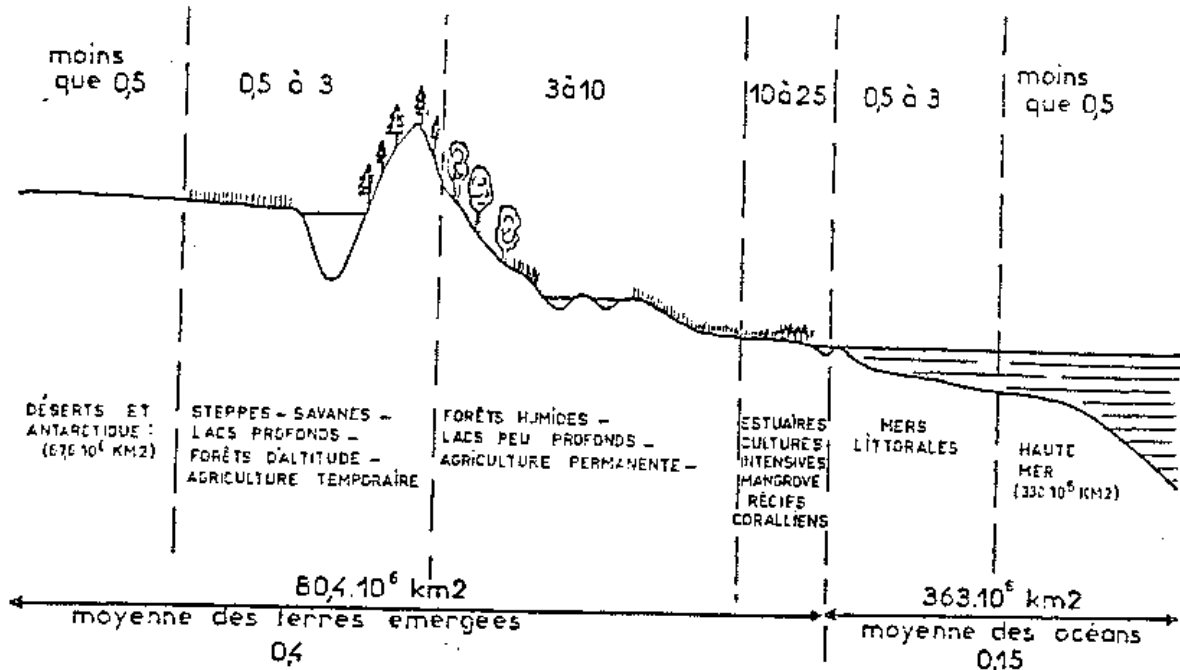


FIG. 117. — Répartition de la productivité primaire brute en grammes de matière sèche par m² et par jour dans divers écosystèmes de la biosphère (d'après ODUM).

D'après R. DAJOZ, op.cité.

On observe quatre régions distinctes. La productivité primaire élevée est limitée géographiquement à certaines régions. Les déserts et les océans ont une très faible productivité à côté des forêts ou des cultures intensives. La productivité primaire totale de la biosphère est estimée à $61 \cdot 10^9$ tonnes de matière organique, équivalent à $2,5 \cdot 10^{17}$ Kcal. Comme l'énergie lumineuse reçue par la terre est le $5 \cdot 10^{20}$ Kcal, l'efficacité photosynthétique à l'échelle du

(1) La productivité primaire est celle des êtres autotrophes chlorophylliens (végétaux). La productivité secondaire est celle des représentants des autres niveaux trophiques, les consommateurs et les décomposeurs. D'après R. DAJOZ, *Précis d'écologie*, Dunod, 1971, p.301.

$$\text{globe est : } \frac{2,5 \cdot 10^{17}}{5 \cdot 10^{20}} \times 100 = 0,05 \%$$

Le rendement de la photosynthèse est faible et pourtant chaque année la quantité de matière fixée (environ 4000 Kcal de matière végétale) est considérable. La biosphère se comporte comme un système ouvert du point de vue des seuls transferts énergétiques. Cependant, H.T. ODUM fait remarquer qu'à l'exception du flux énergétique provenant du soleil, la biosphère du point de vue de la circulation de la matière est un système fermé (1).

La circulation de la matière dans la biosphère s'exprime à travers les grands cycles biogéochimiques. Des éléments circulent de manière alternative entre milieux inorganique et organique, les différentes phases de transformation se déroulant au sein des écosystèmes. De tels cycles expriment un recyclage de la matière (carbone, azote, eau, ...). Les cycles des matériaux sont régis par le flux d'énergie : le recyclage de l'eau nécessite une énergie qui n'est pas elle-même recyclable. Il correspond à chaque stade de recyclage à un coût en énergie inéluctable (2).

La disponibilité réelle des ressources biologiques dans un écosystème dépend comme nous l'avons vu précédemment du flux d'énergie dans l'écosystème, c'est à dire de sa productivité. Il existe donc une différence fondamentale entre la matière et l'énergie : tandis que la matière peut être constamment recyclée au sein des cycles biogéochimiques, l'énergie n'est jamais réutilisée : elle est dégradée en chaleur irréversiblement au niveau des écosystèmes comme au niveau de la biosphère.

Au sein des différents cycles, des régulations s'opèrent et permettent une certaine constance des éléments présents dans chaque milieu. Cette aptitude à l'autorégulation (ou encore à l'homéostasie) est mise en évidence par l'existence de mécanismes de rétroaction ou "feed-back". L'apport des travaux de N.WIENER sur la cybernétique et ce concept central de feed-back dans la discipline est ici évident. (3).

Les écosystèmes sont le siège de tels mécanismes, mécanismes d'autant plus nombreux que l'écosystème est riche en espèces. Ils préservent l'écosystème de toute agression extérieure et de tout dérèglement interne qui mettrait en péril la pérennité de l'écosystème.

(1) H.T. ODUM, *Environment, power and society*, Wiley-Interscience, 1971, p.11.

(2) E.P. ODUM, *Ecologie*, seconde édition, 1976.

(3) Les relations proie-prédateur en écologie peuvent aussi être expliquées par une boucle de rétroaction.

Le recyclage de la matière et l'apport extérieur d'énergie au sein d'un écosystème assurent sa survie. Le flux d'énergie qui confère à l'écosystème un niveau d'organisation particulier et le cycle de la matière qui lui est associé implique une évolution dans le temps vers un état stable, un état climacique (1). C'est un état de stabilité où les flux entrants et les flux sortants s'équilibrent dans le temps. Des fluctuations peuvent se manifester localement : le système est capable de réintégrer l'état antérieur du fait des mécanismes de régulations (2).

Ainsi, "l'interaction de l'énergie et de la matière dans l'écosystème est une préoccupation primordiale de l'écologiste. En fait, on peut dire que le flux univoque de l'énergie et la circulation des éléments sont les deux grandes lois de l'écologie générale puisqu'elles s'appliquent de façon identique à tous les environnements et à tous les organismes y compris l'homme" (3).

Par ailleurs, la prise en compte du "principe du maximum de puissance" introduit par J. LOTKA en 1922 permet d'expliquer la dynamique des systèmes écologiques et des civilisations humaines aux côtés des principes thermodynamiques.(4) Selon ce principe, les écosystèmes qui ont des aptitudes particulières à l'utilisation de la puissance du flux d'énergie (maximisation du flux par unité de temps, optimisation du flux afin d'accroître sa propre efficacité) sont les plus aptes à la survie et à la domination. Les systèmes gagnants sont donc nécessairement dotés d'une grande capacité de rétroaction. Le principe du maximum de puissance exerce ainsi une action structurante sur les écosystèmes tout le long des transferts d'énergie.

La reconnaissance de ce principe amène H.T. ODUM à proposer une évaluation sur la base du concept de "embodied energy" ou énergie incorporée, concept défini comme une mesure de l'action cumulative de l'énergie disponible dans les chaînes alimentaires. L'idée sous-jacente est la suivante : à chaque étape de la chaîne, beaucoup d'énergie est utilisée mais seule une faible part est transformée dans une qualité supérieure (forme plus concentrée). Avec les travaux d' ODUM née ainsi une nouvelle approche du monde réel : c'est l'analyse éco-énergétique.

(1) En biologie, le climax est l'état d'une végétation en équilibre avec les facteurs climatiques. Il constitue pour des groupements végétaux, le terme final d'une succession dans le temps. D'après J.A. TERNISIEN, opus cité, p.59.

(2) E.P. ODUM, Ecologie, 1976, p.10.

(3) E.P. ODUM, cité dans F. RAMADE, Eléments d'écologie, écologie fondamentale, 1984.

(4) J-P DELEAGE, Histoire de l'écologie, Ed. La découverte, 1991, p.137.

Depuis les premières réflexions sur les Silver Springs avec le concept d'énergie incorporée, cette analyse s'est considérablement enrichie. Pour résumer le contenu de cette approche, nous pouvons emprunter la définition de S. FAUCHEUX :

"L'analyse éco-énergétique peut se définir comme une approche des écosystèmes naturels et humains fondée sur la circulation et la transformation de l'énergie depuis sa source à l'extérieur d'un système jusqu'à sa sortie de celui-ci sous forme non récupérable. Elle s'appuie sur la théorie générale des systèmes ainsi que sur les lois de l'énergie, et recourt à un langage spécifique". (1)

L'analyse éco-énergétique est aussi appelée analyse émergétique, par contraction du concept d'"embodied energy". D'autres concepts opérationnels ont vu le jour et notamment celui de transformité solaire et de monergie. Le premier constitue une mesure de l'efficacité énergétique d'une transformation et fournit un indicateur de qualité émergétique. Elle exprime la quantité d'énergie solaire qu'il a fallu pour produire une unité de bien. La transformité solaire des différentes formes d'énergie d'un système permet donc de les qualifier selon la place qu'elles occupent dans la hiérarchie énergétique. (2) Quant à la monergie, il a été construit afin de passer de l'évaluation émergétique en terme d'énergie à l'évaluation monétaire. Elle se définit comme le rapport entre l'énergie du système entier et le produit national brut exprimé en valeur monétaire.

L'approche émergétique a fait l'objet de nombreuses applications afin d'étudier des systèmes mettant en interface l'environnement naturel et les systèmes humains.(3).

Tout aussi importants que les travaux d'ODUM, les travaux de Kenneth E. WATT révèlent les implications des lois de la thermodynamique fondamentales du point des écosystèmes et de leur fonctionnement. Il considère les deux lois de la thermodynamique comme les principes de base de l'écologie : conservation ou invariance de l'énergie au sein des écosystèmes

(1) S. FAUCHEUX, *L'articulation des évaluations monétaire et énergétique en économie*, Thèse de doctorat, Université Paris I, Avril 1990, p.388.

(2) G. PILLET, A. BARANZINI, "Procédure d'évaluation de la part de l'environnement dans un produit économique", *Economie appliquée*, 1988, n°1, p.137-138.

(3) Se reporter notamment aux travaux de:

- G. PILLET, "Externalities in environmental macroeconomics", in G. PILLET, MUROTA T. et al. *Environmental economics, the analysis of a major interface*, Leimgruber, 1987, p.129-153.

- G. PILLET, A. BARANZINI, opus cité, p.139-147.

- S. FAUCHEUX, opus cité, p.380-384.

et limitation du rendement de la conversion énergétique à des valeurs très inférieures à un.

Dans le domaine du vivant, c'est la thermodynamique d'I. PRIGOGINE qui s'applique : le vivant est loin des états d'équilibre. L'équilibre et la permanence des cycles biogéochimiques (flux de matière) résulte d'un apport d'énergie solaire sur la terre. C'est la théorie des fluctuations de PRIGOGINE qui explique aussi bien l'évolution, la structuration, que la destruction et/ou restructuration des écosystèmes.

K. E. WATT détermine cinq ressources principales : la matière, l'énergie, le temps, l'espace et la diversité. Une ressource est donc une entité qui permet à un organisme d'augmenter son pourcentage de conversion d'énergie. Ces cinq ressources constituent les variables écologiques fondamentales, leur interdépendance va caractériser la compréhension de tout écosystème et jouer un rôle dans l'établissement de boucles de rétroaction.

A propos de la ressource "matière", la loi de conservation de la matière est une loi générale. Un recyclage quasi parfait et permanent s'opère au niveau de la matière qui passe alternativement de l'état organique à l'état minéral. A côté des principes thermodynamiques, il précise différents principes écologiques relatifs aux interactions dans les écosystèmes des différentes ressources, à l'autorégulation et aux interactions énergie-matière.

Nous pouvons retenir les principes suivants :

Principes écologiques relatifs à trois ressources selon K.E WATT (1)

l'énergie	- l'intensité du flux solaire conditionne la production de biomasse et donc la disponibilité en ressources animales et végétales d'un écosystème donné
la matière	<ul style="list-style-type: none"> - la disponibilité réelle des ressources biologiques dans un écosystème dépend du flux d'énergie dans l'écosystème. Aucune ressource naturelle, minérale ou biologique n'existe en quantité illimitée compte tenu des besoins de l'humanité - loi de LIEBIG (généralisation) : le défaut comme l'excès d'une ressource sont des facteurs limitants dans l'utilisation des autres ressources - loi de l'optimum : l'accroissement de la disponibilité d'une ressource organique ou minérale n'implique pas une augmentation indéfinie de la productivité (la loi des rendements décroissants est une illustration)
la diversité	<ul style="list-style-type: none"> - la diversité d'un écosystème est proportionnelle au rapport biomasse /productivité (B/P) - ce rapport augmente dans un environnement stable - les écosystèmes les plus diversifiés sont les plus stables (grande capacité homéostatique) - la diversité écologique dépend du temps - la stabilité physique de l'environnement permet l'élévation de la diversité dans les écosystèmes à maturité et favorise la stabilité des populations

Les principes énoncés présentent un fort degré d'interdépendance. La diversité apparaît comme une mesure du degré de complexité d'organisation dans les écosystèmes. Elle est liée à la quantité d'énergie stockée dans la biomasse et au flux d'énergie qui traverse le système (productivité de l'écosystème) (2). Une diversité plus grande reflète un degré de complexification plus grand et traduit un degré de néguentropie ou entropie négative plus élevé. La stabilité d'un écosystème s'accompagne d'un phénomène de structuration qui traduit sa lutte contre l'entropie. Le flux d'énergie qui le traverse lui permet de maintenir un état d'ordre, d'organisation élevé mais au détriment de la désorganisation de son environnement. L'emprunt d'énergie à l'environnement et les flux dissipés dans ce même environnement ne font qu'augmenter l'entropie de celui-ci. Le fonctionnement de l'écosystème s'accompagne d'une dégradation de l'énergie.

(1) Pour une présentation élargie aux écosystèmes humains : P. ESQUISSAUD, Ecologie industrielle, Hermann, 1990, p.8-10.

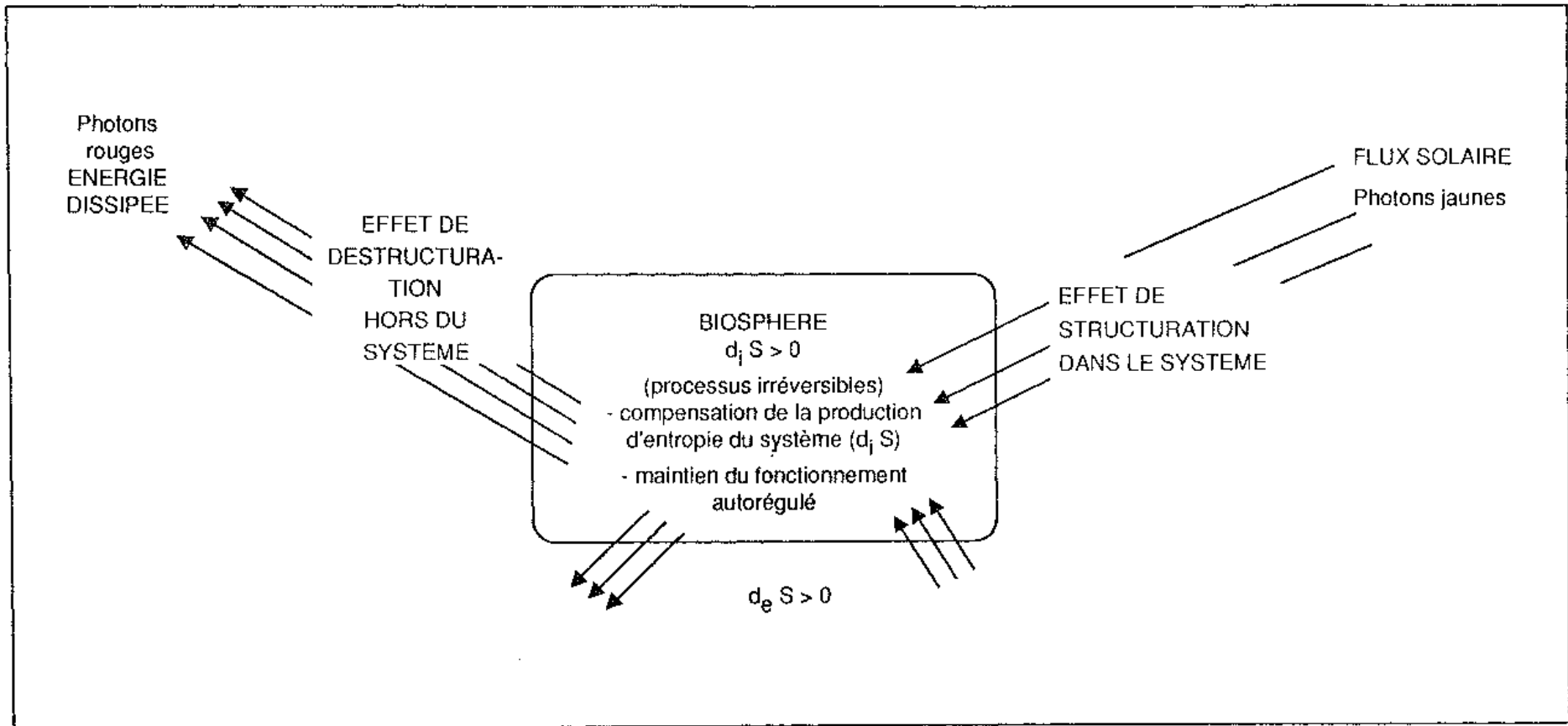
(2) F. RAMADE, Ecologie des ressources naturelles, Masson, 1981, p.25.

Cette dégradation qui implique un flux d'entropie exprime le fait que l'énergie dissipée n'est plus utilisable dans l'écosystème. Au niveau de la biosphère, le maintien de la vie est assuré grâce au déséquilibre thermique entre la surface solaire et la surface terrestre.

La terre reçoit des photons jaunes provenant du soleil et absorbe cette énergie avant de la renvoyer sous forme de photons infrarouges (après conversion en chaleur). Les photons infrarouges sont réémis par la terre avec vingt fois moins d'énergie que l'énergie transportée par les photons jaunes. Le nombre de photons infrarouges réémis par la terre est donc vingt fois plus grand que le nombre de photons jaunes absorbés. Il existe là un facteur d'entropie : l'entropie de la biosphère est proportionnelle au nombre de photons infrarouges réémis par la terre (1). Alors que les éléments vivants s'organisent en se nourrissant des photons jaunes et en rejetant des photons infrarouges, ils contribuent à désorganiser l'environnement (énergie dissipée). L'entropie du système "biosphère + environnement" s'accroît irréversiblement (voir schéma page suivante).

Parvenus jusqu'ici, il apparaît quelques correspondances entre la thermodynamique, l'écologie et la biologie. On peut représenter les homologues fonctionnelles existant entre les trois disciplines.

(2) J.A.TERNISIEN, *L'absolu, ses réalités humaines*, CILF, 1989, p.99.



$$dS = d_i S + d_e S > 0$$

L'entropie de la biosphère augmente

BIOLOGIE	THERMODYN.		ÉCOLOGIE	
Organisme vivant	relation ←-----→	système	relation ←-----→	écosystème
Complexité (ordre de la structure)	←-----→	entropie	←-----→	homéostasie (permanence des cycles)
Structuration	←-----→	fluctuation	←-----→	déséquilibre
Déstructuration	←-----→			

Ces correspondances traduisent le pouvoir explicatif de la thermodynamique à travers la compréhension des fonctionnements des écosystèmes et des êtres vivants grâce aux concepts et aux lois de cette discipline physique. Elle englobe l'inanimé et le vivant à la fois dans une même perspective d'interrogation d'autres domaines de connaissance. Au centre de ces diverses préoccupations, il y a les activités humaines qui jouent un rôle primordial tant au niveau de l'homme lui-même qu'au niveau des écosystèmes et de la biosphère finalement. Il est donc naturel de s'intéresser à l'économie à présent et de mieux comprendre grâce à la thermodynamique son fonctionnement d'ensemble.

Rappelons tout d'abord que l'économie, contrairement à la biologie ou à l'écologie, s'est référée aux modèles de la mécanique Newtonienne et de la thermodynamique classique jusqu'à une époque récente. Ce n'est que dans les années 1960-1970 que quelques économistes se sont intéressés aux apports de la thermodynamique du vivant. La référence au dogme mécaniste s'exprime avec l'économie néo-classique. Les fondateurs de l'École néo-classique se proposent de construire une science économique d'après le modèle mécaniste, "as the mechanico of utility and self-interest" selon les propos de W. STANLEY JEVONS (1).

C'est la réversibilité d'un temps extérieur à l'homme et éternellement recommencé. Une bonne illustration de l'épistémologie mécaniste qui prévaut en économie est le flux circulaire entre la production et la consommation utilisé pour décrire le système économique. On peut emprunter à P.A SAMUELSON le schéma du processus économique.

(1) JEVONS W.S., 1924, cité dans N. GEORGESCU-ROEGEN, *Energy and economic myths*, Pergamon press, 1976, p.3.

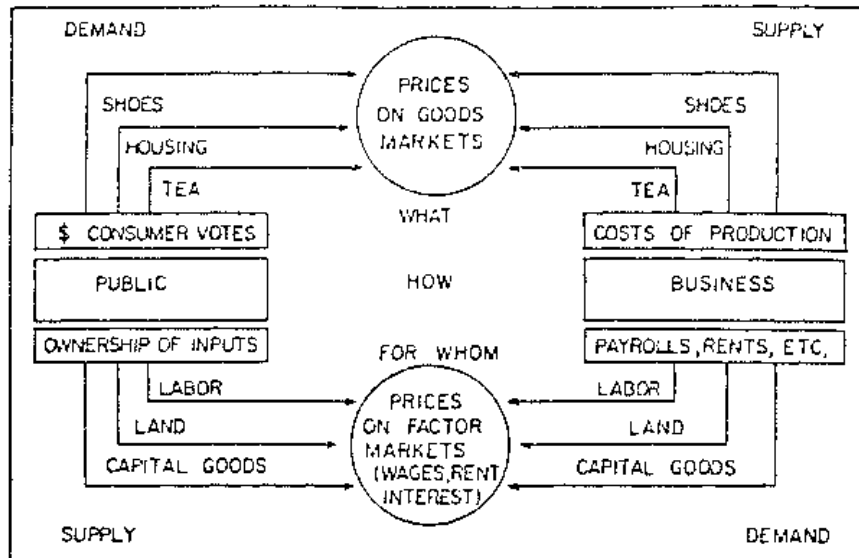


Figure 1. Diagram of the economic process. Reprinted by permission; from Paul Samuelson, *Economics*, McGraw-Hill, 1976.

in H.E DALY, A.F UNANA, *Energy, economics and the environment*, 1981.

Cette figure illustre comment l'économie atteint un équilibre général et comment le système économique atteint un état stable. Cet état stable est l'état initial retrouvé après disparition de la perturbation au sein du système. Un cycle des affaires en suit un autre. Quelque soit la perturbation qui affecte le système économique, le système revient à un état d'équilibre : c'est la réversibilité des trajectoires. De plus, le diagramme fait apparaître aucun échange avec l'extérieur : le système économique est considéré comme un processus autonome qui se suffit à lui-même. Le système économique ne dépend d'aucun facteur hors de lui (ressources naturelles ou main d'oeuvre).

Selon B. SCHEFOLD, "The classical economist visualized the process of production in a capitalist society as a circular flow of commodities on an expanding scale where the net product may in part be productively consumed by the workers, in part it appears as a surplus". (1)

Du point de vue physique, c'est un système isolé. La référence à la thermodynamique classique s'exprime, elle, avec l'économie marxiste. Le temps, irréversible, traduit l'acheminement

(1) B. SCHEFOLD, "Energy and economic theory", *Zeitschrift für Wirtschafts-und Sozialwissenschaften*, vol.97 (3), 1977, p.230.

ment du système vers sa désorganisation, sa destruction. C'est l'évolution vers un état final (société communiste sans Etat) caractérisé par une entropie maximale. Le système est isolé. Les phénomènes liés à la biosphère sont évacués. R. PASSET écrit :

"C'est l'entropie et c'est la fin de l'histoire : si la liberté est totale à l'intérieur du système, les forces qui menaient son évolution ont disparu ; celui-ci n'a plus globalement aucune raison de se transformer ; aucun devenir ne l'entraîne plus à être autre chose que ce qu'il est." (1)

La portée de la thermodynamique de CARNOT ne permet pas de prendre en compte les relations entre le système économique et son environnement. Il faut alors d'ouvrir sur la thermodynamique des systèmes vivants.

Or, c'est bien l'observation du processus économique qui est à l'origine des développements nouveaux des années 1960 en économie.

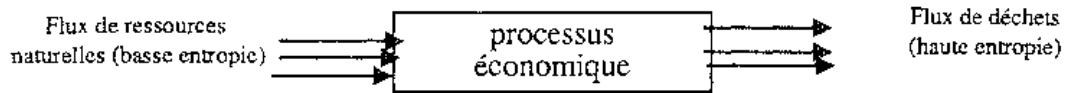
"What then does the economic process do ?" C'est la question posée par N.GEORGESCU-ROEGEN. Sa réponse est résumée ainsi : "The crucial point is that the economic process is not an isolated, self-sustaining process - This process can not go on without a continuous exchange which alters the environment in a cumulative way and without being, in its turn, influenced by these alterations"(2). Il a développé une conception entropique du processus économique : le processus économique est un processus irréversible car soumis à la loi d'entropie.

Des flux d'énergie et de matière le traversent. Mais, tandis qu'à l'entrée ces flux sont dans un état de basse entropie (d'ordre) lorsqu'ils quittent le processus économique, ils sont dans un état de haute entropie (désordre) (voir schéma). Non seulement il considère le processus économique comme un système ouvert mais encore il traduit une différence qualitative essentielle entre les flux d'entrée et les flux de sortie (3).

(1) R. PASSET, "La thermodynamique d'un monde vivant", Futuribles, décembre 1980, p.10.

(2) N. GEORGESCU-ROEGEN, opus cité, p.4.

(3) Ce point sera approfondi dans la section 2 de ce chapitre. Les implications concernant les ressources énergétiques sont fondamentales.



La nature entropique du processus économique est liée à la dégradation, à la dissipation de la matière et de l'énergie. Tout comme un organisme vivant ou un quelconque processus de la nature, les transformations opérées au sein du système économique impliquent un déficit entropique pour le système entier (système économique + environnement).

L'énergie et la matière disponibles sont irrévocablement transformées et inutilisables à la sortie du processus économique. L'entropie est une mesure de l'énergie inutilisable ou encore dissipée dans un système thermodynamique.

GEORGESCU-ROEGEN définit l'entropie comme "an index of the amount of unavailable energy in a given thermodynamic system at a given moment of its evolution" (1).

L'entropie est donc une mesure du désordre au sein du système. La prise en compte de l'ouverture du système économique exprime le reniement de la coupure du monde en évacuant le vivant et l'humain. L'action de l'homme et les activités humaines en général sont à l'origine de sa propre transformation et des modifications de son environnement. D'autres économistes ont insisté sur la réconciliation de l'homme et la nature en proposant des modèles où l'homme est intégré à la biosphère.

Un nouveau paradigme émerge avec des processus économiques en relation avec la physique et la biologie. Aux côtés de GEORGESCU-ROEGEN, Kenneth BOULDING insiste sur la rareté des ressources dans les limitations de la biosphère. "The closed economy of the future might similarly be called the "space man" economy, in which the earth has become a single spaceship, without unlimited reservoirs of anything, either for extraction or for pollution, and in which, therefore, man must find his place in a cyclical ecological system which is capable of continuous reproduction of material form even through it cannot escape having

(1) N. GEORGESCU-ROEGEN, opus cité, p.7.

inputs of energy"(1).

Les concepts de stock et flux sont reconsidérés : il ne s'agit plus de considérer la production et la consommation comme illimitées et de mesurer le succès de l'économie en terme de flux (maximisation de la production nationale). Au contraire, il convient de minimiser les flux afin de maintenir un stock donné nécessaire à la satisfaction des besoins humains. Le flux qui est la compensation de la dépréciation du stock doit être minimisé. C'est le stock qui importe. Le recyclage des déchets issus du système économique ne peut être un palliatif à la finitude des ressources. Le recyclage complet, total est impossible.

GEORGESCU-ROEGEN a exprimé dans ses travaux l'importance de cette quatrième loi de la thermodynamique : "in a closed system available matter continuously and irrevocably dissipates, thus becoming unavailable"(2). Dans un système fermé, il n'existe que des échanges d'énergie avec l'environnement. Notre terre échange de l'énergie avec le reste de l'univers. L'entropie de la matière dans un tel système augmente. La matière dissipée n'est pas recyclable car un recyclage total des molécules dissipées nécessiterait un temps infini (3).

Finalement, l'intervention de l'homme a une influence critique sur les ressources, les dotations terrestres. Chaque société satisfait ses besoins de subsistance en recourant aux ressources d'écosystèmes particuliers. Les relations entre les systèmes économiques et les écosystèmes sont essentielles. La production à partir de ressources impliquent pollution et déchets. Ces derniers perturbent les écosystèmes qui supportent les activités humaines.

En 1968, HERMAN E.DALY a proposé une description de telles interdépendances dans un modèle original (4). Son approche considère le sujet de l'économie et de la biologie comme unique : the life process. A travers deux secteurs, un secteur humain et un secteur non humain, les échanges ou les transferts de ressources sont décrits dans une matrice imput-out-

(1) K.E. BOULDING, (1966), cité dans H.E. DALY, A.F. UMANA, *Energy and economics and the environment*, 1981, p.25.

(2) N. GEORGESCU-ROEGEN, "energy, matter and economic valuation : where do we stand ?", in H.E. DALY, opus cité, p.60.

(3) Les implications de la quatrième loi énoncée par GEORGESCU-ROEGEN seront traitées dans la section suivante. Elles sont révolutionnaires notamment à l'égard de la valeur économique des ressources.

Les processus se déroulant à une vitesse infiniment petite sont réversibles car, à une telle vitesse, les frottements sont inexistantes. Mais un tel mouvement prend un temps presque infini ; c'est pour cette raison que la matière ne peut être totalement recyclée.

(4) H.E. DALY, "On economics as a life science", *Journal of political economy*, vol.76, mai-juin 1968, p.398-405.

put. Le processus économique se comporte comme un organisme vivant : en se référant aux travaux de E.SCHROEDINGER sur la thermodynamique du vivant, le système économique est caractérisé par un état stable à une distance de l'équilibre qui maintient sa structure en absorbant la basse entropie de l'environnement.

DALY précise les fondations biophysiques de l'économie, déjà révélées par le biologiste A.J LOTKA (1956). L'évolution du processus économique est complexifiante et de plus en plus organisée. Des convertisseurs artificiels succèdent aux convertisseurs naturels grâce au transfert du savoir, de la connaissance entre les générations comme l'évolution biologique implique une transmission par les gènes de la "connaissance des formes organiques", l'évolution du processus économique implique celle des connaissances scientifiques. A chaque niveau, il existe un phénomène d'accumulation du savoir qui traduit des échanges avec l'environnement et une structuration, un ordre de plus en plus élevé dans l'organisation de chaque système. L'état de stabilité ou état stationnaire est compatible avec cette évolution vers la structuration dans les limites des conditions de validité du théorème d'ONSAGER. L'état stable ne peut durer indéfiniment : il n'existe que sur une durée finie.

L'évolution du système économique autorise des changements qualitatifs et des réorganisations sur de longues périodes qui maintiennent le système à une distance constante de l'équilibre. A l'état stationnaire, l'activité du système augmente l'entropie de l'environnement. La production d'entropie est minimale (théorème de production minimale d'entropie de PRIGOGINE). Le flux de biens transformés est minimisé. Toute variation du stock de richesses et d'êtres humains implique des changements dans le flux sortant de matière première, à moins que le recyclage ne compense. Si la population augmente, le flux de matière dégradée peut ne pas augmenter dans les mêmes proportions dans la mesure où le recyclage compense.

Cependant, le recyclage a des limites : le recyclage de la matière nécessite de la matière et de l'énergie. L'énergie, elle ne peut être recyclée. Il y a donc une limite maximale au rendement (conséquences de la loi de CARNOT). Le stock de ressources constitue donc bien une limite au flux de biens transformés.

Au sein de la biosphère, l'activité économique apparaît donc bien comme un processus entropique. Elle implique un accroissement de l'entropie de la biosphère. La biologie et l'économie tout comme l'écologie et l'économie sont très proches du point de vue des caractéristiques de fonctionnement. Les principes unificateurs explicatifs issus de la thermodynamique impliquent une compréhension systématique des régulations qui s'opèrent au niveau

global.

Cette approche globale renferme la multiplicité des lois qui fonde une explication cohérente de l'univers. Trois types de systèmes matériels distincts existent : des systèmes en équilibre thermodynamique, des systèmes au voisinage de l'équilibre et des systèmes loin de l'équilibre. A l'équilibre, l'entropie est extremum (second principe, système isolé). Au voisinage de l'équilibre, l'entropie est minimum. C'est le domaine de la thermodynamique linéaire (ONSAGER, PRIGOGINE, système ouvert). Loin de l'équilibre, aucun principe variationnel en général ne peut être défini. On assiste à la formation de nouveaux types d'organisation de la matière, c'est le paradigme des structures dissipatives (non linéarité, ordre par fluctuation). Les structures dissipatives traduisent l'existence d'un ordre maintenu grâce à des échanges avec le milieu environnant qu'ils transforment. N.GEORGESCU-ROEGEN et K.E BOULDING ont montré que le système économique était ouvert et maintenait sa structure en prélevant la basse entropie de l'environnement (ressources naturelles et flux solaire).

Les apports de la thermodynamique des processus irréversibles ont permis d'aller plus loin dans la compréhension du système économique. L'ouverture du système n'est pas une condition suffisante pour son auto-organisation : le système doit être maintenu loin de l'équilibre et il doit exister des interactions non linéaires entre les différentes composantes du système. C'est dans ces conditions que les structures dissipatives apparaissent.

René PASSET considère le système économique comme une structure dissipative ouverte sur l'énergie solaire mise à sa disposition (1). Le flux solaire est soit transformé par les végétaux et circule alors le long des chaînes alimentaires, soit contenu au niveau des stocks de ressources fossiles. L'activité économique est une activité néguentropique (2) consistant à structurer les flux énergétiques pour satisfaire aux besoins humains. La structuration

(1) R. PASSET, "La thermodynamique d'un monde vivant, des structures dissipatives à l'économie", *Futuribles*, décembre 1980, p.22.

(2) La néguentropie est l'entropie négative ; c'est aussi l'information. On distingue l'information-message et l'information-structure. L'information-message véhicule dans un système des indications relatives à son état et à celui de ses composantes. C'est cette information que Schannon définit en proposant de la mesurer comme une probabilité d'apparition d'un événement (apparition d'un symbole dans un message):

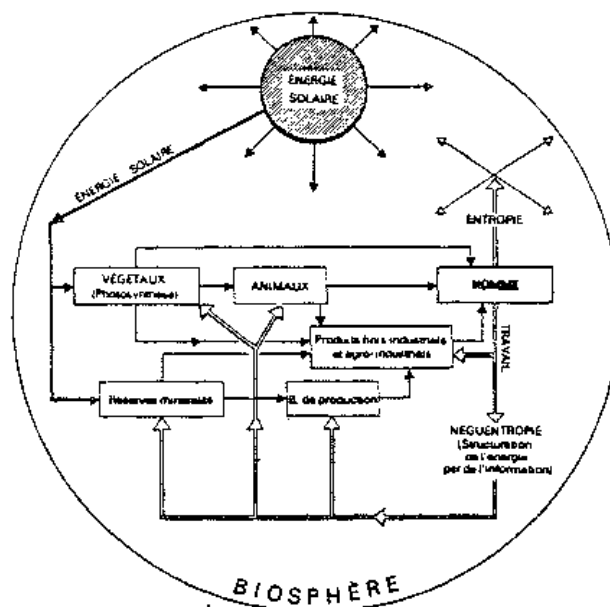
$H = - \sum p(i) \cdot \log_2 p(i)$ H exprime la quantité moyenne d'information contenue par chaque symbole dans un message.

Quant à l'information-structure, R. PASSET considère qu'elle mesure le degré de structuration, le niveau de complexité d'un système. C'est parce qu'un système contient beaucoup d'information-structure donc qu'il est très organisé, qu'il peut effectuer un travail mécanique. Plus il est structuré et plus il est productif et moins il délivre d'information-message. Cf L'économie et le vivant, p.99, p.167-178.



s'opère en incorporant de l'information, grâce au travail, dans la matière.

Cependant, l'économie n'échappe pas à la loi d'entropie : ce qui a été structuré dans les produits se dissipe progressivement par l'usure et la destruction. Les prélèvements de minéraux (substances relativement organisés) en amont du système économique et les restitutions en aval sous des formes déstructurées constituent un exemple.



Source : R.PASSET, *l'économie et le vivant*, Payot, 1979

Son ouverture sur la biosphère n'est pas une condition suffisante à sa reproduction. Le système économique doit tenir compte des limites des flux de reconstitution des ressources renouvelables (ou des "prises de relais" prévisibles pour les ressources non renouvelables) ainsi que des seuils relatifs aux rejets. Les prélèvements et les épuisements de ressources perturbent les mécanismes naturels : ceux-ci, déréglés, vont à leur tour agir sur le système économique (feed-back). Les rejets aussi perturbent les mécanismes d'auto-épuration du milieu : le dépassement de seuils implique une menace pour les activités humaines et la mise en oeuvre de politiques efficaces (coût pour la société et pour le système économique) (1). L'évolution de ces interdépendances est appelée coévolution.

Le franchissement de niveaux critiques ou seuils impliquent la modification des mécanismes

(1) R. PASSET, "Prévision à long terme et mutations des systèmes économiques", *Revue d'économie politique*, n°5, 1987, p.546.

régulateurs assurant la pérennité des systèmes. L'évolution du système économique et l'évolution de la biosphère révèlent l'existence de processus non linéaires exprimés dans le dépassement de seuils (1).

Une autre approche du système économique comme structure dissipative peut être ici mentionnée. C'est celle de Robert U. AYRES (2). Il dépend d'un flux continu d'énergie libre (soleil et ressources naturelles) et, présente une structure, un comportement ordonné. Tel un organisme vivant, le système économique incorpore de l'information structure comme différenciation morphologique et spécialisation fonctionnelle (au niveau de la production et du travail). Le système économique contient de nombreuses caractéristiques définissant des sous-systèmes appartenant aux systèmes vivants.

L'identification physique de l'information avec le concept de néguentropie implique que la structure, l'organisation qui contient l'information soit considérée comme un stock d'entropie négative. Ce stock peut ainsi être utilisé à accroître la capacité d'un système dissipatif à capturer l'entropie négative et les ressources minérales de l'environnement (3). Loin de l'équilibre, une structure dissipative en biologie peut capturer et stocker l'entropie négative de l'environnement afin de l'utiliser dans la forme d'une structure plus évoluée. Un processus d'accumulation de l'information stockée dans le temps (connaissance) par une cellule ou un individu peut être un substitut aux ressources importées dans le système : "resources are created by human intelligence. Solar energy is, of course, captured by photosynthesis and stored as fossil fuels, but to find and use the resources requires knowledge" (4).

Le processus d'accumulation du capital est un processus d'accumulation de l'information. Un autre aspect du processus d'accumulation du capital est le progrès technique. Le système économique est capable de croître. Dans le cas où la croissance implique des changements structurels induits par des innovations radicales, elle s'accompagne d'une complexité accrue et d'une augmentation de l'information stockée/organisation au sein du système. Des mécanismes de régulation (feed-backs) assurent les processus de stabilisation et de croissance avec le transfert d'information. L'activité générant la connaissance a un rôle à jouer dans le ralentisse-

(1) La teneur en CO₂ atmosphérique a progressivement augmenté sous l'effet des activités industrielles et constitue une cause de modifications à l'échelle de la biosphère telle que l'élévation de la température moyenne.

(2) R.U. AYRES, *Self-organization in biology and economics*, research report, january 1988, IIASA.

(3) R.U. AYRES, opus cité, p.12.

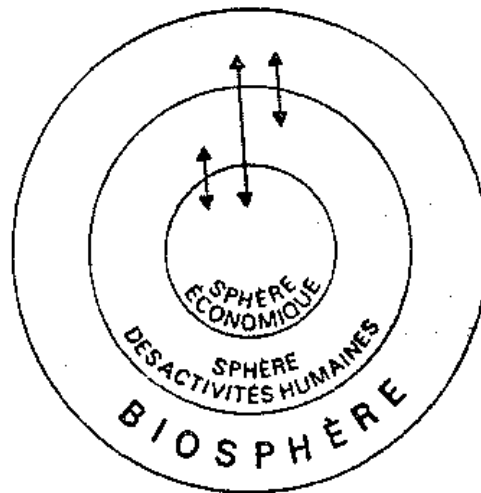
(4) R.U. AYRES, opus cité, p.17.

ment de l'entropie globale: elle permet d'améliorer l'efficacité des technologies et de proposer de nouvelles technologies relatives aux ressources renouvelables. La capacité de l'homme à créer des technologies doit augmenter encore (1).

AYRES propose ainsi une perception différente du système économique : c'est un système en croissance guidé par le changement technologique issu de changements structurels, innovations radicales, qui le perturbent. L'information et son stockage dans le temps (savoir) sont déterminants du point de vue de l'accroissement de l'entropie de la biosphère.

Elles permettent au système économique de ralentir l'accroissement d'entropie global, le flux de ressources provenant de l'environnement est ainsi minimisé. L'importance des lois relatives à l'énergie pour le système économique apparaît chez les différents économistes cités. La thermodynamique à travers ses implications directes sur l'économie, mais aussi à travers ses implications indirectes (relation avec l'écologie et la biologie, ou encore avec la cybernétique et la théorie de l'information) révèle à l'économie une ouverture sur le vivant nécessaire (voir schéma page suivante).

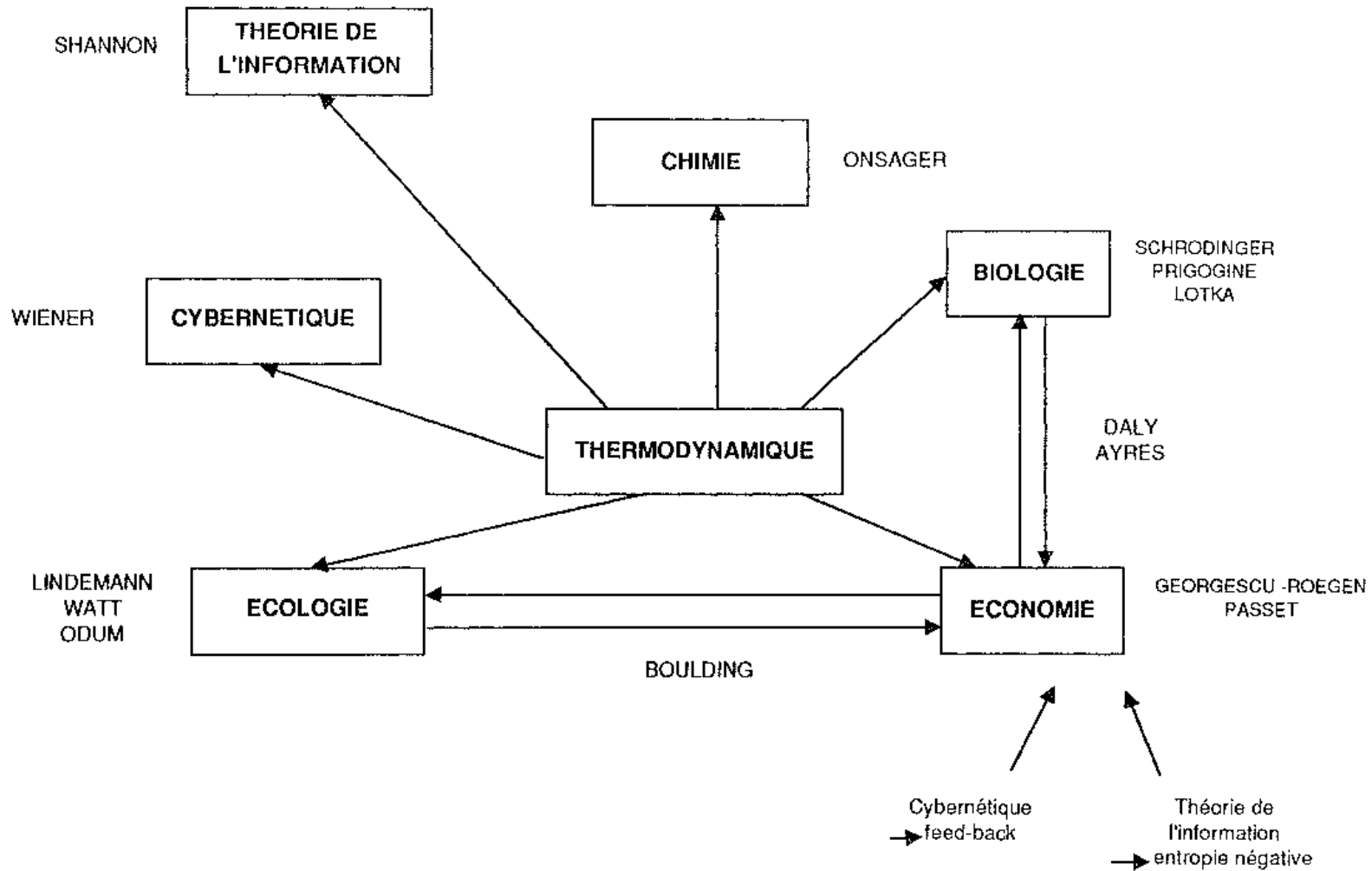
Il existe une cohérence globale au niveau du tout que la réduction à ses parties détruirait. "Et l'humain, à son tour, s'ouvre sur l'univers plus large de la matière vivante et inanimée - la biosphère - qui l'englobe et le dépasse" (2).



(1) R.U.AYRES, opus cité, p.25.

(2) R. PASSET, *L'économie et le vivant*, Payot, 1979, p.10.

LA THERMODYNAMIQUE DE LA COMPREHENSION DU VIVANT ET DE L'INANIME



Enfin, dans la section qui va suivre, les ressources naturelles longtemps considérées en dehors du système économique, vont être appréciées par rapport à leur appartenance à la biosphère, système englobant le système économique. Une appréciation plus large de leur valeur économique et plus précise du concept de rareté va découler de cette approche dont le fondement repose sur les implications de la thermodynamique. Les conséquences de cette analyse seront une resituation du calcul économique à sa vraie place et donc une restriction de son champ d'application.

Section 2 - Une appréciation originale des ressources énergétiques

§1 - Entropie et valeur économique de la ressource

A l'origine d'une redéfinition de la notion de valeur (1) des ressources énergétiques se trouvent les travaux de biologistes et d'écologistes tels A. LOTKA, E. SCHRODINGER et H. ODUM.

Cependant, deux courants distincts peuvent être observés. L'un, dans la lignée des apports de ODUM, accorde une importance majeure à l'énergie qu'il identifie à la valeur économique. Il s'appuie également sur LOTKA pour qui l'énergie constitue le principe fondamental des fondations biophysiques de l'économie. L'autre courant, plus proche de SCHRODINGER, considère l'énergie et la matière et rejette la théorie énergétique de valeur. Ce second courant se réfère aussi à LOTKA mais du point de vue de son analyse globale de l'évolution qui met en exergue l'action de l'homme sur les cycles biogéochimiques (2).

Le postulat qui consiste à dire qu'il existe une identité entre l'énergie et la valeur économique, trouve ses origines au 19ème siècle dans les travaux des physiciens (3). Cependant, c'est surtout avec les travaux de ODUM et notamment son analyse énergétique que la théorie énergétique de la valeur se développe (4). L'énergie apparaît comme le dénominateur commun à tous les biens. C'est une substance homogène.

L'étude des flux énergétiques au sein des écosystèmes, tout comme les flux de matière opérant au sein des cycles biogéochimiques se situe au niveau des différents réseaux trophiques. H. ODUM souligne l'importance du potentiel d'énergie brute et finalement la faible quantité de cette énergie qui peut effectivement être transformée. Il va définir un langage élaboré, outil indispensable à l'élaboration des diagrammes énergétiques(5). Le concept d'énergie nette est fondamental pour lui. Au début des années 1970, les Etats-Unis recoi-

(1) Dans la théorie classique, la valeur d'une ressource est exprimée par le prix de la ressource, prix déterminé par le marché. Cette perspective ne sera pas abordée ici.

(2) J. GRINEVALD, "L'effet de serre de la biosphère, de la révolution thermo-industrielle à l'écologie globale", in *Stratégies énergétiques, biosphère et société*, mai 1990, p.16-17.

(3) Se reporter à P. MIROWSKI, *More heat than light*, Cambridge university press, 1989.

(4) Voir notamment : R. PASSET, *L'économie et le vivant*, Payot, 1979, p.178-184. Voir aussi le paragraphe précédent.

(5) H. ODUM développe dans les années 60 un langage symbolique permettant d'identifier les prélèvements, les pertes, les échanges, les feedbacks intervenant au sein des systèmes naturels et humains.

vent 16×10^{15} kcal par année mais seulement la moitié de l'énergie reçue est convertie en travail utile. L'énergie nette correspond seulement à 8×10^{15} kcal par année (1).

ODUM va étendre l'analyse énergétique à la société et va exprimer notamment des relations particulières entre flux énergétiques et flux monétaires dans les transactions économiques des agents. Les flux énergétiques sont en quelque sorte organisés grâce à la monnaie au sein des échanges (2). Les équivalents énergétiques sont donc considérés comme des mesures justes de la monnaie qui constitue une image commode des flux réels.

En 1973, le premier choc pétrolier consolide les défenseurs de la théorie énergétique de la valeur. Les sociétés industrielles sont fortement dépendantes des ressources fossiles qui sont limitées. Des études sont menées pour évaluer le revenu national des économies en terme d'énergie nette, concept emprunté à ODUM. Il est évalué à l'aide des processus de production des combustibles desquels sont déduites les quantités d'énergie contenues dans les outils de production, les transports, etc ...

Finalement, seule l'énergie importe. Cette croyance est d'ailleurs renforcée par l'équivalence célèbre d'EINSTEIN : $E = mc^2$. La matière est alors considérée comme une forme d'énergie. Parmi les défenseurs d'une théorie énergétique de la valeur, citons DALY et UMANA, ainsi que COSTANZA qui tente de confirmer empiriquement la théorie à l'aide du concept d'énergie incorporée (3).

A l'opposé de ce courant dominant, se situe un courant minoritaire qui s'oppose à la théorie énergétique de la valeur en apportant un éclairage nouveau et plus juste à notre avis sur la valeur des ressources énergétiques. Ce courant est représenté par les travaux de l'épistémologue et économiste Nicholas GEORGESCU-ROEGEN. Deux apports fondamentaux sont à l'origine d'une "nouvelle théorie de la valeur" :

- l'intégration de la loi d'entropie dans le processus économique
- la définition d'une nouvelle loi de la thermodynamique relative à la matière et ses implications.

(1) E.P. ODUM, *Ecologie*, 1976, p.86-87.

(2) H.T. ODUM, *Environment, power and society*, Wiley-interscience, 1971, p.175.

(3) R. COSTANZA, "Embodied energy, energy analysis, and economics", in H.E. DALY, A.F. UMANA, *Energy, economics, and the environment*, 1981, AAAS Selected Symposium, p.119-145.

Voir également à propos des partisans d'une théorie énergétique de la valeur :

- W. VAN GOOL and al., *Energy and time in the economic and physical sciences*, 1985.
- G. PILLET, A. BARANZINI, "Procédure d'évaluation de la part de l'environnement dans un produit économique", *Economie appliquée*, 1988, n°1, p. 129-150.

A plusieurs reprises, GEORGESCU-ROEGEN critique vivement les défenseurs de la théorie énergétique de la valeur, qu'il nomme sous la vocable de dogme énergétique car en premier lieu, ils méconnaissent la seconde loi de la thermodynamique.

Nous avons présenté au paragraphe précédent le processus économique tel que le conçoit l'auteur. En amont, de la matière-énergie est absorbée par le processus. Elle est dans un état de basse entropie, sa structure est ordonnée. En aval, le processus rejette de la matière-énergie de haute entropie, il s'agit là de déchets sans valeur. Les ressources sont puisées dans l'environnement : elles constituent un stock d'énergie libre disponible ou encore potentielle que l'homme peut utiliser une seule fois. Toute réutilisation est impossible. Conformément à la loi d'entropie, l'énergie est irrévocablement dissipée (forme non disponible).

La distinction entre énergie disponible et énergie dissipée est de nature anthropomorphique. Du point de vue de la thermodynamique, GEORGESCU-ROEGEN souligne un point important : "Thermodynamics is at bottom a physics of economic value and the entropy law is the most economic in nature of all natural laws" (1).

C'est la distinction économique entre les biens qui ont une valeur économique et les déchets sans valeur qui a suggéré la distinction thermodynamique basse et haute entropie, et non l'inverse. Sadi CARNOT dans son mémoire célèbre a été le premier à étudier l'économie des machines thermiques (problème du rendement). La thermodynamique a ainsi commencé comme une physique de la valeur économique. L'existence d'une énergie potentielle est une condition nécessaire pour qu'une ressource ait une utilité positive, une valeur. La basse entropie est donc une condition nécessaire pour l'utilité mais pas suffisante. (tout comme l'utilité est une condition nécessaire mais non suffisante pour la valeur économique). La relation entre basse entropie et valeur économique est semblable à celle qui existe entre valeur économique et prix.

"An object can have a price only if it has economic value, and it can have economic value only if its entropy is low. But the converse is not true" (2).

On ne peut alors prétendre, comme le fait la théorie énergétique de la valeur, représenter des évaluations économiques par des équivalents énergétiques.

Il faut alors préciser "ce que fait le processus économique" pour compléter l'approche de

(1) N. GEORGESCU-ROEGEN, *Energy and economic myths*, Pergamon press, 1976, p.8.

(2) N. GEORGESCU-ROEGEN, opus cité, p.60.£

GEORGESCU-ROEGEN. La réelle production du processus n'est pas la production de matière-énergie sans valeur (déchets de haute entropie), donc un flux matériel de déchets. C'est en réalité le flux immatériel de la joie de vivre, "the enjoyment of life" (1).

Il se refuse ainsi à considérer le processus économique comme un vaste système d'équations thermodynamiques. "The economic process moves through an intricate web of anthropomorphic categories, of utility and labor in the first place. Its true product is not a physical flow of high entropy, but the imaterial flux of the enjoyment of life obtained by the drudgery of work" (2). Il réfute l'identité "énergie = valeur économique" tout comme il se refuse à l'idée de réduire la valeur économique à une valeur chimico-physique à travers le concept d'entropie. De même, les valeurs économiques ne peuvent être réduites au concept d'énergie incorporée.

Le second point essentiel qui s'oppose au dogme énergétique et qui dans ses prolongements projette une nouvelle valeur des ressources réside dans la distinction entre l'énergie et la matière. Soulignant que la thermodynamique ne s'est intéressée qu'aux transformations relatives à l'énergie, le dogme énergétique a pu postuler que seule l'énergie avait de l'importance. La loi d'entropie se réfère seulement à l'énergie, comme l'a souligné K. BOULDING : "there is, fortunately, no law of increasing material entropy" (3). Considérant le système comme fermé et donc où seuls des échanges d'énergie ont lieu, il s'en suit la possibilité d'un recyclage complet dans la mesure où on alimente le système en énergie suffisante. Dans le modèle énergétique, aucune matière n'est apportée le système économique et aucune matière n'est rejetée dans l'environnement (4). Il existe un processus de recyclage total de la matière à l'état de déchets. Seule la dissipation de l'énergie que traduit sa non disponibilité définitive pour tous les usages est retenue.

"Matter matters too" est une critique sévère de N. GEORGESCU-ROEGEN envers le dogme énergétique qui considère l'énergie et la matière comme interchangeable (la matière est une forme d'énergie). La matière, comme l'énergie, est irrévocablement dégradée et dispersée dans des formes non accessibles. Il existe alors une distinction fondamentale entre l'énergie et la matière : "the rub is that unlike mass and energy, matter is a highly heterogeneous category. Every chemical element has at least one property that characterizes it completely and hence renders it indispensable in some technical recipes.

(1) N. GEORGESCU-ROEGEN, opus cité, p.9.

(2) N. GEORGESCU-ROEGEN, "Energy, matter and economic valuation : where do we stand ?", in H.E. DALY, A.F. UMANA, *Energy economics and environment*, 1981, p.69.

(3) opus cité, p.55

(4) opus cité, p.56

We must therefore expect that, in contrast with the general theory of energy (thermodynamics), the study of transformations of matter in bulk should be hard going"(1).

La diversité des phénomènes physiques a été balayée par le dogme énergétique qui reconnaissait la matière comme forme de l'énergie et donc comme une substance homogène alors que la spécification des processus de production n'est possible qu'en considérant justement les propriétés diverses de la matière.

N. GEORGESCU-ROEGEN définit alors une nouvelle loi de la thermodynamique. Dans un système fermé (qui n'échange que de l'énergie avec l'environnement) l'entropie de la matière augmente irrévocablement et tend vers un maximum (2). La matière disponible est donc irrévocablement dissipée, dégradée dans une forme non disponible.

D'où la conséquence essentielle : le recyclage complet est impossible.

Les relations entre le processus économique et l'environnement vont traduire la circulation de l'énergie et de la matière de manière distincte. La circulation de l'énergie et de la matière dans le modèle de GEORGESCU-ROEGEN font apparaître six sous-processus agrégés :

P₀ = production de la matière contrôlée CM à partir de la matière puisée dans l'environnement (MS)

P₁ = production de l'énergie contrôlée CE à partir de l'énergie puisée dans l'environnement (ES)

P₂ = production du capital d'équipement (K)

P₃ = production des biens de consommation (C)

P₄ = industrie du recyclage des déchets de matière (RM)

P₅ = l'économie des ménages

(1) Cité in P. MIROWSKI, "Energy and energetics in economic theory : a review essay", *Journal of economic issues*, vol.XXII, n°3, september 1988, p.822.

(2) Ne pas confondre avec la formulation classique de la loi d'entropie qui se réfère seulement à l'énergie dans un système isolé.

La circulation globale des flux entre le processus économique et l'environnement
selon N. GEORGESCU-ROEGEN

Sous -processus composant le processus économique

Environnement	(P0)	(P1)	(P2)	(P3)	(P4)	(P5)	
ES MS	- M ₀ + X ₀₀ - X ₁₀ - X ₂₀ + W ₀	- e ₁ + X ₁₁ - X ₂₁ + W ₁	- X ₀₂ - X ₁₂ + X ₂₂ - X ₄₂ + W ₂	- X ₀₃ - X ₁₃ - X ₂₃ + X ₃₃ - X ₄₃ + W ₃	- X ₀₄ - X ₁₄ - X ₂₄ + X ₄₄ - W ₄	- X ₁₅ - X ₂₅ - X ₃₅ + W ₅	CM CE K C RM GJ
DE DM R	+ d ₀ + S ₀ + r ₀	+ d ₁ + S ₁ + r ₁	+ d ₂ + S ₂ + r ₂	+ d ₃ + S ₃ + r ₃	+ d ₄ + S ₄ + r ₄	+ d ₅ + S ₅ + r ₅	

remarque : les flux précédés d'un signe "-" expriment des flux entrants pour le processus considéré (: inputs). Au contraire, des flux précédés d'un signe "+" traduisent des flux sortants (: outputs).

A l'entrée du processus économique, les flux primaires sont ES et MS. A la sortie, trois flux sont observés : un flux relatif à l'énergie dissipée (DE), un flux relatif à la matière dissipée (DM) et un flux représentant les rejets (R). Ce dernier flux est composé de matière disponible et d'énergie disponible mais dans une forme non utilisable potentiellement pour le moment (par exemple les déchets urbains ou encore les déchets nucléaires).

GEORGESCU-ROEGEN fait apparaître distinctement la dissipation de l'énergie et la dissipation de la matière au sein du système global (environnement + processus économique), dissolutions issues des différents processus et s'écoulant dans l'environnement.

Par ailleurs, le processus de recyclage (P4) ne peut plus recycler l'ensemble des déchets de matière comme c'était le cas avec le dogme énergétique. Comme la matière dissipée est irrévocablement perdue, (P4) ne peut recycler que les "garbojunk" notés GJ. Tous les sous-processus économiques produisent des "rejordures" qui ne sont ni de la matière dis-

siée ni des déchets, mais de la matière utilisable dans sa forme inutile (1). Le processus de recyclage recycle les "garbojunk" des autres processus et ceux qu'il produit lui-même. A la sortie du processus économique, il n'existe pas ainsi de flux GJ.

La circulation des flux traduit deux points importants : le système économique survit grâce à un apport continu d'énergie et de matière, et il ne peut recycler que les "garbojunk", c'est à dire la matière qui est encore disponible mais qui ne l'est plus sous une forme utilisable. Dès lors, même si tous les rejets R pouvaient être recyclés, la dissipation de la matière impliquerait une diminution du fonds de capital (2). Il apparaît inhérent que la matière et l'énergie ne peuvent être réduits à une même dénominateur. La valeur économique est ainsi conditionnée par la basse entropie de la matière et par la basse entropie de l'énergie. Les fondements de la valeur économique résident dans la basse entropie de l'énergie et de la matière.

Le processus économique poursuit deux objectifs étroitement liés. Un objectif matériel : c'est la mise en forme des instruments nécessaires aux hommes. Un objectif immatériel : c'est le produit de toute activité humaine, "the enjoyment of life". Les implications du point de vue de la valeur économique des ressources sont essentielles : l'existence d'une valeur est corrélée à l'existence d'une contrainte double du point de vue de la matière et de l'énergie à l'égard de l'entropie. On ne peut raisonnablement considérer comme le fait le dogme énergétique qu'une proportionalité existe entre les prix et l'énergie incorporée. Considérer une relation proportionnelle entre les deux reviendrait à ignorer la dissipation de l'énergie (et inéluctablement de la matière qui en fait partie puisque le dogme énergétique considère "matière = énergie") et donc le fait que toute énergie ne peut être utilisée qu'une seule fois. Il convient d'apporter une précision ici. Il est clair que l'existence d'une énergie potentielle est nécessaire pour qu'une ressource ait une valeur.

Cependant toute énergie disponible n'a en réalité une valeur que si elle est accessible à l'homme. L'énergie solaire est accessible sans effort et sans consommation d'énergie utilisable. Par contre, dans tous les autres cas, l'homme doit investir du travail et des matières premières pour puiser dans une réserve d'énergie disponible. Les technologies qui mesurent l'accessibilité des ressources nécessitent de plus en plus de matière (technologies nucléaires ...). Finalement, cette dernière remarque traduit ce que GEORGESCU-ROEGER

(1) N. GEORGESCU-ROEGER, *Demain la décroissance*, Ed. Favre, 1979, p.119.

Font partis des "garbojunk" : les vieux journaux, les bouteilles cassées...

(2) Cette implication est fondamentale du point de vue de l'état stationnaire. Même en considérant que l'économie ait atteint un état stationnaire, le stock de capital ne peut demeurer constant. Un flux continu de matière est nécessaire pour remplacer la matière dissipée, sinon le stock de capital diminue inéluctablement.

appelle l'évolution exosomatique de l'homme : progressivement, il est devenu un grand destructeur de basse entropie d'origine terrestre (1). L'attachement de l'homme à des organes exosomatiques implique une accélération de la dégradation entropique et une nécessité de recycler la matière dans la mesure où à notre échelle la conversion de l'énergie en matière ($E = mc^2$) est impossible.

L'idée sous-jacente est que la dot terrestre n'est pas illimitée : il faut prendre en compte la finitude des ressources accessibles et donc la rareté des ressources dans le contexte des lois de la thermodynamique.

(1) N. GEORGESCU-ROEGEN, in H.E. DALY, A.F. UMANA, opus cité, p.71-73.

§ 2 - Entropie et rareté de la ressource

L'appréciation de la rareté des ressources relativement aux lois de la thermodynamique doit beaucoup aux travaux de N. GEORGESCU-ROEGEN. Il écrit : "the entropy law is the taproot of economic scarcity. Where it not for this law, we could use the energy of a piece of coal over and over again, by transforming it into heat the heat into work, and the work back into heat (...). In such an imaginary, purely mechanical world, there would be no true scarcity of energy and materials" (1).

Le processus économique absorbe et transforme des ressources de basse entropie puisées dans l'environnement. En contre partie, il rejette des déchets. Il vit donc de son ouverture sur l'environnement. Les ressources de basse entropie présentes dans l'environnement sont constituées par le stock d'énergie libre emmagasinée dans les dépôts minéraux et par le flux solaire intercepté par la terre.

Comme nous l'avons précisé au paragraphe précédent, la distinction entre énergie disponible et énergie non disponible a permis à la thermodynamique de considérer que seul un état particulier de l'énergie pouvait être utilisé par l'homme : l'énergie disponible. Or, l'homme ne peut utiliser qu'une partie de l'énergie disponible : c'est l'énergie accessible. L'évolution exosomatique de l'homme est révélatrice. L'homme a inventé tout au long de son histoire de nouveaux instruments exosomatiques mais aussi de nouveaux moyens pour les produire.

Ainsi, la découverte du feu a permis la fonte et la forge des métaux ou encore la cuisson des briques, des céramiques. Puis succède l'âge du bois. Pendant des siècles, le bois fut l'unique somme d'énergie calorifique. Avec l'épuisement des forêts et les réglementations qui en découlent, le charbon s'est substitué au bois. Les problèmes liés à l'exploitation des mines de charbon (inondations) furent résolus avec l'apparition de la machine à vapeur. Tout comme le feu, elle permet d'améliorer la conversion de l'énergie calorifique en travail. Avec un peu de charbon et la machine à vapeur, des quantités plus importantes de charbon ont pu être extraites.

D'autres minerais ont également pu être extraits et ont participé à la fabrication de machines thermiques, lesquelles ont conduit à plus de machines encore. Finalement, nous nous situons dans le prolongement de cette spirale dévoreuse de ressources de basse entropie - "we are now the prisoners of an exosomatic structure created by an extraordinary bonan-

(1) N. GEORGESCU-ROEGEN, *Energy and economic myths*, Pergamon press, 1976, p.9.

za of fossil fuels" (1).

Deux enseignements en découlent du point de vue de la rareté des ressources :

1 - les technologies et les améliorations successives auxquelles elles donnent lieu ont permis et permettent encore de reculer les limites de l'inaccessibilité des ressources (2). L'accessibilité des ressources est évaluée grâce aux technologies qui fournissent une mesure de l'efficacité énergétique qui prend en compte l'entropie (notion de rendement énergétique)

2 - comme les ressources fossiles étaient et sont considérées comme abondantes, seule leur disponibilité a été retenue et finalement aujourd'hui encore, cela revient à considérer qu'elles ne sont pas contraintes par l'épuisement des gisements.

Le premier point renvoie à l'efficacité énergétique des procédés mis en oeuvre dans l'exploitation et la transformation des ressources. Cependant, il est faux de croire que le progrès technique pourra jouer pleinement dans l'augmentation des rendements des transformations énergétiques. Les conséquences des travaux de Sadi Carnot ne peuvent être ignorées : ils font de l'entropie une limite absolue, indépendante de l'état de l'art, au progrès technique.

le rendement thermodynamique : sa limite

Tout moteur thermique fonctionne par échange de chaleur entre une source chaude et une source froide. Pour créer un mouvement avec de la chaleur, il faut créer une différence de température entre deux points du système. Soit T_0 , la température de la source froide et T_1 , la température de la source chaude. Le rendement du moteur s'écrit :

$$R = \frac{T_1 - T_0}{T_1} = 1 - \frac{T_0}{T_1}$$

C'est un rendement théorique qui est un maximum : aucune machine réelle fonctionnant entre T_1 et T_0 ne peut transformer en travail une fraction supérieure à $1 - T_0/T_1$ de la quantité de chaleur prise à la source chaude. Les températures de sources froide et chaude fixent une valeur maximale au rendement. Ce rendement est toujours inférieur à 1. C'est une limite supérieure du rendement. Pour des machines réelles, les frottements contribuent à diminuer le rendement ; Cela explique la dégradation de l'énergie. On observe ainsi dans la réalité de faibles valeurs de rendement : rendement des réacteurs nucléaires, environ 32 %, celui des moteurs automobiles, environ 25 %, ou encore des centrales thermiques avec 54 %.

(1) N. GEORGESCU-ROEGEN, in H.E. DALY, A.F. UMANA, opus cité, p.73.

(2) L'exemple du pétrole off-shore est illustratif : on est arrivé à atteindre des profondeurs impensables il y a quelques années : au large du Brésil se trouve l'un des plus profondes exploitations pétrolières du monde avec 1565 mètres de fond.

L'efficacité énergétique est donc nécessairement contrainte par la limite théorique du rendement. La loi d'entropie détermine cette contrainte. Il en découle que la quantité d'énergie de basse entropie ainsi que la quantité de matière de basse entropie sont finies. Dans les deux cas, c'est la basse entropie qui importe car c'est elle qui est rare car limitée. La basse entropie exprime donc la rareté absolue. La distinction entre l'énergie et la matière chez GEORGESCU-ROEGEN est fondamentale. Nous avons dans le paragraphe précédent précisé l'importance de la quatrième loi de la thermodynamique relative à la dissipation de la matière.

Tout d'abord, physiquement, il est impossible de convertir de l'énergie seule en matière. Il faut à la fois de l'énergie et de la matière. La terre est un système thermodynamique ouvert si on considère le seul flux d'énergie. De point de vue du flux de matière, elle peut être assimilée à un système fermé. Donc, le résultat qui découle de ces considérations est le suivant :

L'homme doit compter sur les ressources minérales pour la satisfaction de ses besoins et ces ressources sont irremplaçables et s'épuisent inéluctablement.

La raréfaction constante et absolue des matériaux de basse entropie est inévitable. Non seulement la matière est dissipée mais le recyclage des déchets ne peut être que partiel, la terre du point de vue de la matière étant un système fermé.

Concernant la rareté des ressources fossiles, le second point mentionné ci-dessus révèle l'existence d'un mythe : le mythe de l'inépuisabilité des ressources. En réalité, il est essentiel de comprendre que la rareté s'appuie sur une notion purement qualitative et non quantitative. Les ressources nécessaires à l'homme sont toujours des ressources de basse entropie accessible. Comme ces ressources existent en quantité finie, "no taxonomic switch can do away with that finiteness".

Les enseignements de la thermodynamique traduisent non seulement la limite absolue des technologies, organes exosomatiques indispensables à l'homme, mais aussi les limites à la substitution des ressources de basse entropie matérielle. Ce second enseignement est illustré par la phrase de GEORGESCU-ROEGEN : "However, substitution within a finite stock of accessible low entropy whose irrevocable degradation is speeded up through use cannot possibly go on forever" (1).

(1) N. GEORGESCU-ROEGEN, *Energy and economic myths*, Pergamon press, 1976, p.17.

Finalement, il est nécessaire d'économiser les ressources de matière disponible, et cela, d'ailleurs, même dans un état stationnaire (1). Conjointement, il s'avère indispensable de recycler partiellement les matériaux ainsi que de prolonger leur usage. La distinction entre ressource disponible et ressource accessible est l'expression de la rareté en termes thermodynamiques relativement à la technologie. La loi d'entropie imprime une évolution irréversible et unidirectionnelle au système économique.

Les travaux de GEORGESCU-ROEGEN ont trouvé un écho particulièrement intéressant chez trois économistes allemands participant ainsi à une reconnaissance du fondement biophysique de l'économie. Nous allons ainsi présenter et discuter l'intérêt de leur approche qui nous apparaît fondamentale notamment pour l'appréciation de la rareté des ressources dont la mesure est volontairement physique et non économique (2). Le point de départ de leur analyse est l'utilisation du concept d'entropie afin d'établir des relations entre le système économique et le système environnemental.

Nous nous limiterons, ici, au développement relatif au problème de la rareté des ressources, problème étroitement lié à l'activité d'extraction. Le processus d'exploitation des ressources est considéré comme un processus thermodynamique qui "extraît" l'énergie libre des ressources et par conséquent diminue l'énergie disponible tandis que l'énergie dissipée s'accroît. Une mesure de la non-disponibilité de l'énergie est l'entropie du système. Une conséquence importante en résulte : l'extraction induit des changements d'entropie dans le secteur environnemental. Une relation particulière entre l'entropie et la concentration des ressources dans les gisements est mise en évidence. L'approche entropique va permettre de caractériser le problème de la rareté des ressources sous un nouvel éclairage. Tout d'abord, le processus d'extraction de la ressource est divisé en deux étapes : la première est constituée par le processus d'appropriation et la seconde par le processus de séparation (3) (voir le schéma page suivante). Le processus d'appropriation prend les éléments du volume V contenant un certain type d'éléments m de l'environnement pour les introduire dans le système économique (1).

Le processus de séparation sépare les matières premières désirées des autres substances contenues dans la base matérielle (par exemple extraction du fer à partir du minerai de fer).

(1) N. GEORGESCU-ROEGEN montre que l'état stationnaire est un mythe économique : en effet, le stock de capital ne peut être maintenu constant du fait de la dissipation de la matière.

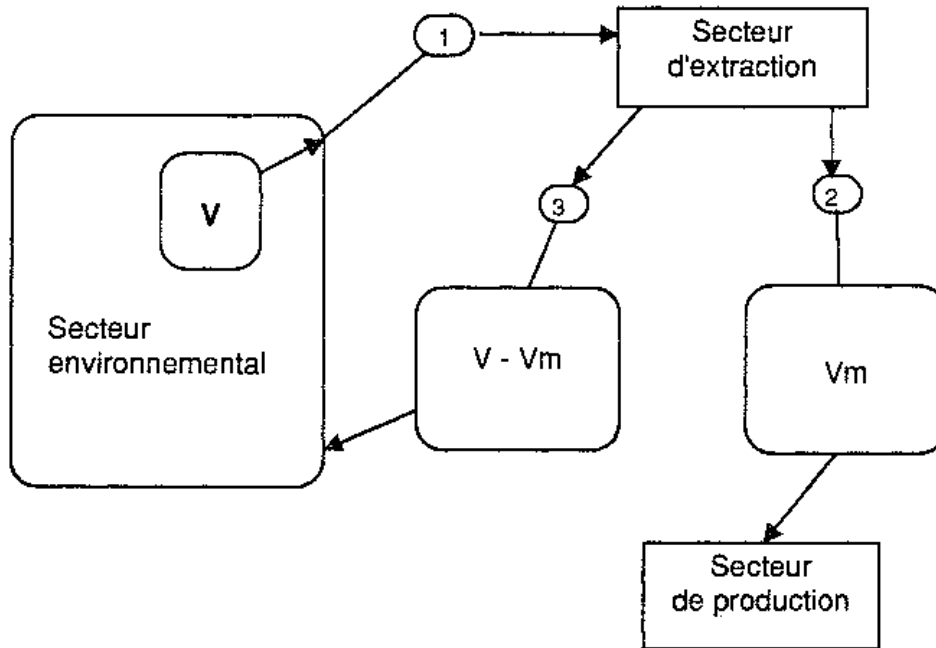
(2) M. FABER, H. NIEMES, G. STEPHAN, *Entropy, environment and resources, an essay in physico-economics*, Springer-Verlag, 1987.

(3) M. FABER et al., opus cité, p.105.

C'est dans cette forme concentrée que la matière première "m" est finalement utilisée dans la production des biens de consommation et des biens capitaux (2).

Les substances qui ne sont pas utilisées sont renvoyées dans le secteur environnemental (3).

Les processus d'appropriation et de séparation dans l'extraction des ressources :



(1) processus d'appropriation de la base matérielle de volume V de l'environnement

(2) séparation des matériaux de type "m" avec un volume V_m

(3) retour des types de matériaux non utilisés avec un volume $V - V_m$ dans l'environnement

Le processus de séparation d'une matière première "m" nécessaire à la production doit être aussi parfait que possible. Lors de la séparation, on maximise la concentration de la ressource sous contraintes économiques.

La concentration de la ressource en éléments de type "m" est déterminée de la manière suivante :

soit N_1, \dots, N_M les quantités de moles des ressources de type 1, ..., M qui sont contenues dans une unité de base matérielle V. On obtient pour la concentration de la ressource en matériaux de type "m" dans V :

$$(a) k_m(V) = \frac{N_m}{\sum_{j=1}^M N_j} \quad m \text{ appartient à } (1, \dots, M)$$

Un processus de séparation parfait fournit une concentration de la ressource de $k_m(V_m) = 1$ pour un volume V_m qui contient les éléments de type "m" dans une forme concentrée. Dans ce cas, le volume V_m ne contient que des éléments de type "m". Si la séparation n'est pas parfaite, la concentration de la ressource obtenue en V_m est inférieure à 1 mais supérieure à la concentration initiale $k_m(V)$.

Le processus de séparation qui a lieu dans l'extraction des ressources est considéré comme l'inversion d'un processus de diffusion particulier, le processus de diffusion des gaz (1). Considérant les implications de la seconde loi de la thermodynamique et essentiellement le fait que dans un système fermé, la séparation ne peut jamais avoir lieu d'elle-même, un tel processus est accompagné d'une diminution de l'entropie. L'inversion du processus de diffusion est causé par l'utilisation d'un flux d'entropie négative -ie l'utilisation de ressources de basse entropie dans le secteur de production.

Le processus d'extraction est supposé ne pas changer le volume total V. Soit V, un volume qui contient les ressources $m = 1, \dots, M$ avec le nombre de moles N_m . Le nombre de moles du système entier est :

$$(b) N = \sum_{m=1}^M N_m$$

(1) M. FABER et al., opus cité, p.83-90.

La diffusion des gaz est un processus qui s'accompagne d'une augmentation de l'entropie avec un mélange homogène des deux gaz à l'intérieur de deux récipients. Un tel processus est irréversible. Une destruction de l'entropie supposerait une séparation spontanée des deux gaz. La loi d'entropie interdit une diminution de l'entropie pour des processus irréversibles présents dans des systèmes fermés.

La concentration k_m de la ressource "m" est :

$$(c) \quad k_m = \frac{N_m}{N} \quad m \text{ appartient à } (1, \dots, M)$$

Chaque ressource a un volume V_m . Considérant des hypothèses relatives aux corps simples solides et aux gaz, le volume V_m s'écrit : $V_m = \frac{N_m}{N} V = k_m V$

$$(d) \quad \frac{V_m}{V} = \frac{N_m}{N} = k_m$$

Soit le processus de séparation qui à partir du volume V extrait la ressource 1 dans un volume V_1 . La ressource 1 occupant le volume V_1 , les autres ressources $m = 2, \dots, M$ sont contenues dans le volume $V - V_1$. La différence d'entropie résultant de la séparation est obtenue de la même manière que dans le cas de la diffusion de deux gaz ; seul le signe est différent puisqu'on a à faire avec le processus inverse.

Le changement d'entropie de la ressource 1 du volume V au volume V_1 s'écrit :

$$(e) \quad \Delta S_1 = - N_1 R \log (V/V_1) \text{ où } R \text{ est la constante universelle des gaz parfaits (1).}$$

Pour les autres ressources, le changement d'entropie s'écrit :

$$(f) \quad \Delta S_m = - N_m R \log \left(\frac{V}{V - V_1} \right), \quad m = 2, \dots, M$$

La différence d'entropie du système entier étant la somme des différences individuelles (notion extensive de l'entropie) et d'après (b), on a :

$$(g) \quad \sum_{m=2}^M N_m = N - N_1$$

(1) se reporter aux pages 79-87 de l'ouvrage cité.

et :

$$\Delta S = \Delta S_1 + \Delta S_m$$

$$\Delta S = \sum_{m=1}^M \Delta S_m \quad (h)$$

$$\Delta S = -R (N_1 \log (V/V_1) + (N - N_1) \log (V/ V - V_1))$$

ou encore :

$$(i) \quad \Delta S = N_1 R (\log (k_1) + ((1 - k_1) / k_1) \log (1 - k_1))$$

C'est la différence d'entropie nécessaire pour produire une unité de ressource désirée. Elle est en relation avec le volume ou avec le nombre total de moles. La quantité molaire est une unité quantitative. La différence d'entropie par mole de la ressource 1 s'écrit :

$$(j) \quad S_{N_1} = \frac{\Delta S}{N_1} = R \left(\log (k_1) + \frac{(1 - k_1)}{k_1} \log (1 - k_1) \right)$$

S_{N_1} est appelée "the mol-specific entropy difference"

S_{N_1} indique le flux négatif d'entropie nécessaire à l'extraction d'une mole de ressource 1.

La concentration de la ressource k_1 appartient à l'intervalle] 0,1 [: $0 < k_1 < 1$ et

$$0 < 1 - k_1 < 1$$

La fonction logarithme prend des valeurs négatives sur cet intervalle, la différence entropique est donc négative.

Les auteurs ont calculé des valeurs particulières pour la relation entre le changement d'entropie en terme de mole d'une ressource et la concentration initiale de la même ressource (1). Les résultats graphiques sont les suivants.

(1) M. FABER et al., opus cité, p.125-126.

The Change in Entropy as a Function of Resource Concentration

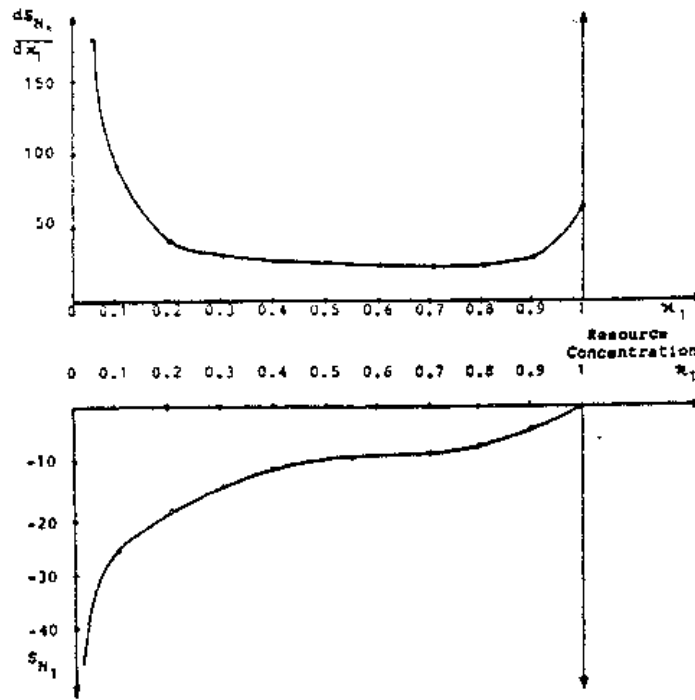


Fig. 4.3 (above). First derivative of the mol-specific entropy change with respect to resource concentration

Fig. 4.4 (below). Mol-specific entropy change as a function of resource concentration

La première figure révèle que le flux d'entropie négatif qui accompagne le processus d'extraction nécessaire pour augmenter la concentration de la ressource d'une unité marginale doit être plus élevé pour des concentrations initiales très basses ou très hautes que pour des concentrations intermédiaires. La seconde figure indique que le flux d'entropie négatif qui accompagne le processus d'extraction est d'autant plus petit que la concentration initiale est élevée.

Cependant, il convient de préciser que le processus de séparation, s'il diminue l'entropie en tant que processus inverse de celui de la diffusion, ne contredit pas la loi d'entropie dans la mesure où un flux négatif d'entropie entre dans le système. Ce flux que l'on note ΔS_a , diffère du changement d'entropie qui accompagne le processus de séparation noté ΔS_e , seulement par le signe.

$$\text{d'après (h) : } (k) \quad \Delta S_a = - \Delta S_e = - R (N_1 \log k_1 + (N - N_1) \log (1 - k_1))$$

$$\text{d'après (j) : } (l) \quad - \Delta S_{N_1} = - R (\log k_1 + \frac{1-k_1}{K_1} \log (1 - k_1))$$

$$K_1$$

C'est le flux d'entropie par mole de la ressource 1 dans le processus de diffusion.

A partir de là, il est possible de montrer la relation existant entre ce flux d'entropie et l'échange d'énergie qui l'accompagne entre le système et son environnement. L'utilisation de l'équation de Gibbs ($du = Tds$) traduit comment le flux d'entropie est lié au flux d'énergie qui l'accompagne. On note : $\Delta U = T \Delta S$

En supposant que le processus d'extraction remplit la condition de Gibbs, et d'après (k) et (l), on peut établir une relation pour les besoins d'énergie U_{N1} par mole de ressource 1 :

$$U_{N1} = \frac{1}{N1} \Delta U = \frac{T}{N1} \Delta S_a = - \frac{T}{N1} \Delta S_e$$

$$(m) \quad U_{N1} = - RT \left(\log k_1 + \frac{1-k_1}{k_1} \log (1-k_1) \right)$$

Le changement d'entropie par mole de ressource 1 - expression (j) - et le changement d'énergie par mole de ressource 1 - expression (m) - ne diffèrent que par la température T. Si on suppose T constant, les deux expressions sont dépendantes de la concentration en ressource k_1 .

Plus la concentration est basse et plus les besoins d'énergie nécessaire pour extraire la ressource sont élevés. Par ailleurs, les besoins énergétiques par mole de ressource 1 augmentent plus que proportionnellement avec la diminution de la concentration initiale de la ressource. En d'autres termes, les coûts d'extraction s'élèvent avec des quantités plus faibles de ressources disponibles. Ce résultat est très important : au cours du temps, on observe une évolution à la hausse des coûts d'extraction du fait de la nécessité d'augmenter l'input énergie pour extraire les ressources. Cela s'explique par le fait que l'utilisation des ressources rares avec la baisse de la concentration en ressource implique un accroissement d'entropie à l'intérieur du secteur environnemental.

Un dernier point relatif au changement d'entropie de l'environnement considéré comme le résultat de l'extraction de la ressource mérite d'être mentionné.

Soit la ressource 1 : $N^u_1 (s)$ est le stock de ressource 1 dans une partie de l'environnement u à un moment "s"

$N^u_1 (0)$ est le stock de ressource 1 en $t = 0$

$N^i_1 (0)$ sont les stocks initiaux dans les différents dépôts

On a :

$$N^{u_1}(0) = \sum_{i=1}^I N_1^i(0)$$

Soit $n_1^i(t)$: les quantités extraites dans les dépôts i durant la période t .

La quantité extraite totale des périodes précédant $(s - 1)$ et incluant celle-ci :

$$\overline{N^{u_1}(s-1)} = \sum_{t=1}^{s-1} \sum_{i=1}^I n_1^i(t)$$

L'état temporel du stock des ressources $N^{u_1}(s)$ relatif à la ressource 1 à la période s est

$$N^{u_1}(s) = N^{u_1}(0) - \overline{N^{u_1}(s-1)}$$

$$N^{u_1}(s) = \sum_{i=1}^I \left(N_1^i(0) - \sum_{t=1}^{s-1} n_1^i(t) \right) \quad s = 1, 2, \dots$$

On peut définir une concentration moyenne de la ressource notée $k^{u_1}(s)$:

$$k^{u_1}(s) = \frac{N^{u_1}(s)}{N^u(s)} \quad s = 1, 2, \dots$$

$N^{u_1}(s)$: ressource 1 restant dans l'environnement en s .

Dans le cas où les déchets ne sont pas renvoyés dans la partie u de l'environnement, on peut écrire la relation suivante:

$$\overline{N^u(s)} = N^u(0) - \overline{N^{u_1}(s-1)}$$

$N^u(s)$ = quantité de matériaux en s restant dans l'environnement

$\overline{N^{u_1}}$ = quantité de ressource 1 retirée

La concentration moyenne de la ressource $k^u_1(s)$ s'écrit dans le temps :

$$k^u_1(s) = \frac{N^u_1(0) - N^u_1(s-1)}{N^u(0) - N^u_1(s-1)}$$

$$k^u_1(s) = \frac{N^u_1(0) - \sum_{t=1}^{s-1} \sum_{i=1}^I n^i_1(t)}{N^u(0) - \sum_{t=1}^{s-1} \sum_{i=1}^I n^i_1(t)}$$

$s = 1, 2, \dots$

Cette relation traduit comment chaque extraction de ressources de l'environnement diminue la concentration moyenne. L'extraction des ressources constitue ainsi une exploitation du stock disponible de services écologiques. Ces pertes, interprétées comme une augmentation de l'entropie du secteur environnement, conduisent à une augmentation ultérieure des facteurs utilisés dans l'extraction des ressources (1). Cette relation exprime un lien entre l'environnement, en tant qu'offreur de ressources et le sous-système économique.

Si on différencie par rapport à $n^i_1(t)$, on obtient :

$$dk^u_1(s) = - \frac{(N^u(0) - N^u_1(0))}{(N^u(0) - N^u_1(s-1))^2} \cdot dn^i_1(t) < 0$$

pour $N^u(0) > N^u_1(0)$ et $dn^i_1(t) > 0$

Chaque extraction additionnelle de ressource en "t" diminue la concentration moyenne de la ressource. Cependant, une diminution additionnelle de la concentration de la ressource dans le secteur environnemental s'accompagne d'une augmentation additionnelle de l'entropie dans ce secteur. Chaque utilisation du stock de ressources entraîne une diminution

(1) Pour les auteurs, seul l'input travail (énergie mécanique) est utilisée dans l'extraction des ressources.

du niveau d'ordre du secteur environnemental et de ce fait une augmentation de l'entropie. Cette diminution du niveau d'ordre (traduite par une concentration moyenne de la ressource plus faible dans les gisements) doit être compensée dans les périodes suivantes par une quantité d'énergie additionnelle dans le processus de séparation. Cela signifie qu'il faut fournir plus d'effort pour extraire la même ressource.

L'utilisation de quantités de ressources rares en diminuant leur concentration induit inévitablement une augmentation de l'entropie dans l'environnement.

Le processus économique engendre une augmentation irréversible de la diffusion des ressources. Deux exemples de gaspillage de basse entropie et de diffusion sont significatifs ; il s'agit de l'extraction du cuivre et de l'utilisation du gaz naturel. Pendant les 200 dernières années, la concentration du cuivre dans les gisements est passée de 12 % à 0,4 %. Concernant le gaz naturel, il contient une substance particulière, l'hélium qui est dotée de nombreuses propriétés (légereté, inertie, ...). Cependant, il n'est pas systématiquement séparé du gaz et est donc libéré dans l'atmosphère où sa concentration passe de 3000 ppm à 5 ppm (1).

Nous reprendrons ultérieurement les enseignements de l'approche entropique de FABER, NIEMES et STEPHAN. D'ores et déjà, nous avons pu saisir l'importance des lois thermodynamiques pour une meilleure compréhension de la sphère économique au sein de son environnement naturel. Nous pensons que le concept d'entropie est essentiel et qu'il constitue la base de l'enracinement biophysique de l'économie. La dégradation de l'énergie et de la matière font du processus économique un système thermodynamique dont l'évolution est irréversible. Les implications des lois thermodynamiques concernent aussi les activités énergétiques organisées au sein du système énergétique. L'appartenance à la biosphère des ressources énergétiques en tant qu'entités physiques, leurs transformations par les technologies et leurs utilisations sont autant de représentations abstraites des différents et successifs états physico-chimiques inéluctablement orientés par la loi d'entropie. En considérant le système global, c'est à dire le système énergétique et la biosphère, nous allons analyser sa cohérence globale au regard des lois thermodynamiques.

(1) M. FABER, "A biophysical approach to the economy, entropy, environment and resources", in W. VAN GOOL, *Energy and time in the physical sciences*, Elsevier science publishers B.V., 1985, p.331-332.

Conclusion du chapitre

L'appartenance à la biosphère du patrimoine énergétique implique sa soumission aux lois de la thermodynamique, lois qui régissent son évolution et l'amènent irréversiblement à accroître l'entropie de son environnement.

La loi d'entropie nous a permis de comprendre la limite absolue de la disponibilité des ressources énergétiques malgré la persistance du mythe de l'inépuisabilité, mythe entretenu par la méconnaissance irresponsable des apports de la thermodynamique à l'égard de l'énergie et de la matière.

L'approche entropique révèle ainsi l'émergence d'une totalité organisée : le système global composé du système énergétique, de la biosphère et de leurs interrelations. Ce système global, où chaque partie, sous-partie, sous-sous-partie, etc... est en relation directe ou indirecte avec une autre partie, une autre sous-partie, une autre sous-sous-partie, etc... est doté d'une cohérence d'ensemble maintenue par les lois de la thermodynamique.

CHAPITRE 6:

LE SYSTEME ENERGETIQUE ET LA BIOSPHERE : UN SYSTEME THERMODYNAMIQUE OUVERT SUR LA BIOSPHERE

Introduction

Le système énergétique au regard des lois de la thermodynamique et des principes écologiques est un système non autonome qui entretient des relations de réciprocité avec la biosphère (flux d'échanges de matière et d'énergie). Il constitue un système ouvert générant dans son environnement naturel un flux entropique croissant et perpétuant sa structure grâce à un apport conséquent de basse entropie puisé dans ce même environnement. Il est donc doté de deux propriétés essentielles : une nature inéluctablement dissipative et organique.

L'évolution du biosystème (système énergétique + biosphère +interactions) est ponctuée par le rôle des mécanismes de régulation intervenant au niveau des processus internes et externes de changement. Cependant, elle semble plus orientée par des processus d'évolution externes qui, de plus en plus, exprime des dérapages du système énergétique, système en rupture avec les mécanismes de régulation de la biosphère (processus internes).

Au regard de cette évolution, une tentative de réponse basée sur la coévolution sera esquissée.

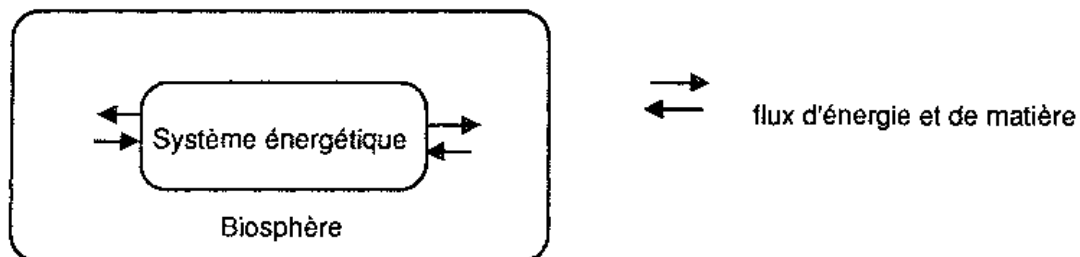
Section 1 - Nature et propriétés du système énergétique

§ 1 - Un système dissipateur ouvert sur la biosphère

Le système énergétique va à présent être reconsidéré et redéfini à l'aide des lois de la thermodynamique qui orientent son évolution dans le temps. Nous avons tout au long du chapitre précédent exposé la portée de la thermodynamique dans le champ des activités humaines et particulièrement au sein de l'activité économique à travers le processus économique. Celui-ci, en tant que structure destinée à gérer l'allocation des ressources de manière optimale pour la satisfaction des besoins, s'intéresse aux ressources énergéti-

ques et aux moyens de les transformer. Le système énergétique est en quelque sorte une composante particulière du système économique dont la finalité est le contrôle, la maîtrise de l'énergie. Les ressources énergétiques appartiennent à différents milieux physiques de la biosphère - ou milieux naturels - et sont donc soumises à des régulations écologiques. Qu'elles se présentent sous forme de stocks ou de flux, elles sont régulées par les mécanismes assurant le maintien de la vie au sein de la biosphère (cycles biogéochimiques, transferts d'énergie et de matière au sein des écosystèmes, rôle des organismes vivants et des végétaux dans les conversions énergétiques ...). Mais elles font aussi l'objet d'une appropriation par l'homme et d'une gestion particulière afin de satisfaire les besoins d'une communauté. Ce domaine là est bien souvent considéré, à tort, comme relevant de régulations purement économiques et géopolitiques. Dans ce cas, les considérations thermodynamiques sont étrangères à l'analyse.

Nous allons étudier le système énergétique comme élément complexe appartenant à la biosphère et obéissant aux lois de la thermodynamique. Le système global est donc défini comme un ensemble d'éléments ou constituants du système énergétique et de la biosphère qui le contient, éléments qui sont en interaction dynamique, en interrelations mutuelles.



Des flux d'énergie et de matière sont constamment échangés entre le système énergétique et la biosphère. La biosphère comporte trois niveaux physiques : lithosphère, l'hydrosphère et l'atmosphère au sein desquels des échanges, des flux d'énergie et de matière circulent et assurent la vie en permanence. Elle contient à la fois les milieux inanimés et les milieux vivants. La biosphère constitue un système fermé : elle n'échange avec l'univers cosmique que de l'énergie. Le seul apport énergétique est constitué par le flux solaire, l'ap-

port matériel est inexistant (1). Ce flux représente une puissance de $179\,000 \times 10^9$ kw. C'est le rayonnement solaire qui parvient jusqu'à la surface de la terre. Il représente un apport de $8,8 \times 10^{20}$ kcal par an (2). A la limite supérieure de l'atmosphère, au niveau de l'orbite terrestre, ce flux présente une valeur appelée "constante solaire", qui s'élève à environ $1,36$ kw par m^2 de surface perpendiculaire à la direction des rayons. Cette valeur fluctue de 2 % au cours du cycle annuel du fait de la variation de la distance terre-soleil (3).

Il est important de noter le rôle déterminant des organismes autotrophes dans la genèse de la biosphère : il s'agit de l'apparition des végétaux capables de réaliser la photosynthèse, c'est à dire d'utiliser une fraction du flux solaire pour synthétiser à partir du gaz carbonique, de l'eau ainsi que d'éléments minéraux, toutes les substances organiques nécessaires à la vie. La fonction chlorophyllienne des végétaux assure l'entrée de l'énergie libre dans la biosphère. Sans la photosynthèse, la biosphère serait un vaste système isolé sans vie.

Le rayonnement solaire est en partie intercepté et converti en une forme d'énergie chimique potentielle contenue dans les molécules organiques (aliments). Les rendements de la conversion de l'énergie lumineuse en énergie chimique sont variables car dépendent d'un certain nombre de facteurs (chaleur, eau, ...) : au niveau global, le rendement est de l'ordre de 0,4 à 0,8 % (4). Un rôle important est donc joué par les végétaux au sein du monde biologique et du monde minéral.

L'énergie lumineuse, ou encore le flux solaire, se situe à la base de la plupart des sources énergétiques disponibles à l'homme. On distingue celles qui proviennent directement de la conversion de l'énergie solaire en énergie chimique par la photosynthèse. C'est le cas des végétaux autotrophes.

A côté de ces ressources énergétiques, il existe les dépôts de combustibles fossiles qui correspondent à un stockage d'énergie de très longue durée. Au cours des temps géologiques, les végétaux ont permis d'élaborer des masses considérables de matières organiques. Ce phénomène correspond à la mise en réserve d'une partie du flux d'énergie solaire.

(1) Le phénomène des pluies de météorites existe (150 000 tonnes par an). Mais ce flux de matière constitue une "poussière" et est donc négligeable.

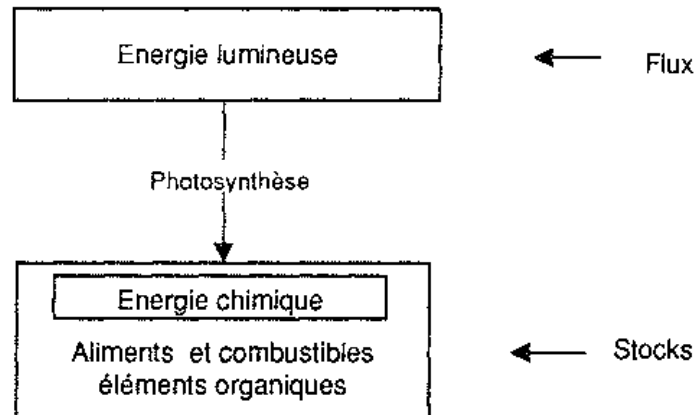
(2) F RAMADE, *Ecologie des ressources naturelles*, Masson, 1981, p.131.

(3) F. RAMADE, *Eléments d'écologie, écologie fondamentale*, Mc Graw-Hill, 1984, p.14.

(4) R. DUMON, *Economies et conversions d'énergie*, Masson, 1980, p.57. Pour D. GED, seulement 0,06% de l'énergie lumineuse est utilisée par la photosynthèse, in *Pour la science*, novembre 1990, p.26.

re sous forme d'énergie chimique. Issues de ce processus millénaire, les ressources énergétiques disponibles sont le charbon, le pétrole, le gaz.

Le flux solaire, unique intrant énergétique, est à l'origine du stockage de l'énergie chimique, dans la biosphère ; stockage de courte ou de longue durée. Du point de vue thermodynamique, on peut observer l'existence d'un flux négatif d'entropie ou déficit entropique du système constitué par la biosphère et l'univers (1).



Un flux constant d'énergie en provenance du soleil - rayonnement solaire - est intercepté à la surface de la terre : dU_s (chaleur reçue par la terre). Soit T_s la température moyenne à la surface de la terre qui reçoit les radiations du soleil. Le flux d'énergie solaire s'accompagne d'un flux d'entropie vers la terre : dS_s

L'entropie s'écrit : $dS_s = \frac{dU_s}{T_s} \quad \text{---->} \quad dU_s = T_s dS_s$

Symétriquement, il existe un flux constant de chaleur et d'entropie de la terre vers le reste de l'univers respectivement notés dU_E et dS_E

On a : $dU_E = T_E dS_E$

(1) L'exposé qui suit est issu de l'ouvrage collectif : m. FABER, H. NIEMES, G. STEPHAN, *Entropy, environment and resources*, Springer-Verlag, 1987, p.93-94.

T_E est la température des surfaces au sol qui rayonnent vers l'univers. Dans la mesure où la température sur la terre est constante à la longue, le flux d'énergie sortant provenant de la terre doit être compensé par le flux d'énergie intrant en provenance du soleil :

$$dU_S = - dU_E$$

Concernant la différence entropique de la terre, on a : $dS_S - dS_E = \frac{dU_S}{T_S} - \frac{dU_E}{T_E}$

$$\text{<----> } dS_S - dS_E = \left(\frac{1}{T_S} - \frac{1}{T_E} \right) dU_E < 0$$

Cette différence est négative car T_S est supérieure à T_E . En terme de température, elle correspond à la différence entre le jour et la nuit (déséquilibre thermique). Le flux d'entropie libéré par la biosphère est supérieur au flux d'entropie provenant du soleil $dS_S > dS_E$

La captation du flux solaire par les végétaux a donc un coût entropique : elle diminue l'énergie libre en se nourrissant du flux de basse entropie au prix d'une plus grande dissipation de l'énergie, ou en d'autres termes, en augmentant l'entropie de la biosphère (1).

Si la quantité d'énergie est invariante, sa qualité est irrévocablement et continuellement altérée. C'est à ce prix que la vie est possible. L'ouverture de la biosphère sur le flux solaire traduit la dissipation de l'énergie dans le temps.

Il convient pour en terminer avec le fonctionnement thermodynamique de la biosphère de considérer le cycle de la matière, indissociable de l'étude du flux d'énergie. Il n'existe pas de flux de matière en provenance de l'univers. La biosphère constitue de ce point de vue un système isolé au sein duquel les différents matériaux sont décomposés, dégradés. Nous avons précisé au chapitre précédent (2) que la circulation de la matière s'effectue à travers les cycles biogéochimiques au sein desquels le recyclage des éléments a lieu. Les matières minérales demeurent en quantités constantes.

Cependant, du fait des activités humaines, les ressources minérales largement sollicitées ont vu leurs gisements à haute teneur s'épuiser progressivement. Cela constitue un chan-

(1) Un moyen de ralentir l'accroissement entropique consisterait à augmenter le rendement de la photosynthèse et donc la transformation de l'énergie lumineuse en énergie chimique.

(2) Se reporter au chapitre 5, section 1 §2. "La thermodynamique et les sciences humaines.

gement qualitatif de la matière in situ que l'on peut considérer alors comme dégradée. La qualité des stocks contenus dans le sous-sol est donc irrémédiablement dégradée du fait de l'extraction. Nous y reviendrons par la suite.

Nous ne pouvons plus à présent considérer seulement la biosphère du fait de l'évolution des sociétés humaines. Comme l'a étudié F. RAMADE, la civilisation technologique contemporaine a bouleversé d'une part le flux d'énergie par un recours massif aux combustibles fossiles, d'autre part le cycle de la matière avec l'utilisation de ressources minérales accrue et la présence de déchets industriels non biodégradables.

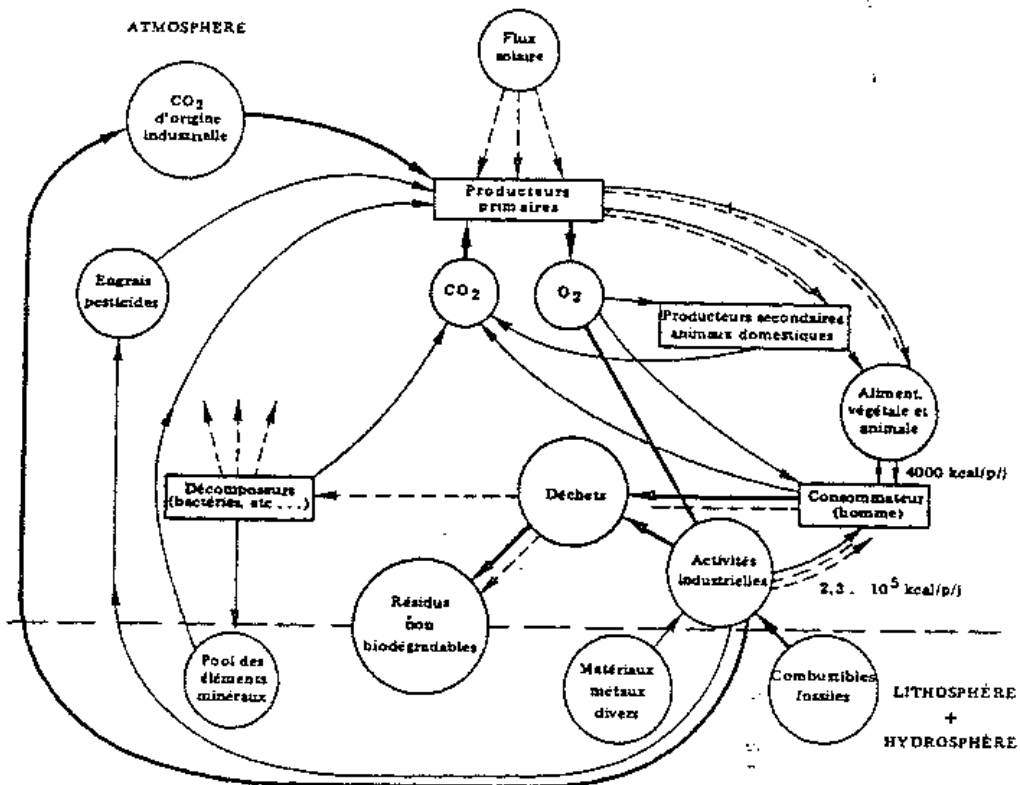


Schéma du flux de l'énergie et du cycle de la matière dans la civilisation technologique contemporaine.

Source : F. RAMADE, *Ecologie des ressources naturelles*, 1981.

Des déséquilibres qualitatifs et quantitatifs se sont opérés, en rupture totale avec la situation qui prévalait dans la civilisation néolithique(1).

Le système énergétique est donc un sous-ensemble de la biosphère qui mérite une attention particulière. Nous donnerons une première définition générale du système énergétique. Le système énergétique est l'ensemble des ressources renouvelables et fossiles transformées par le processus économique afin de satisfaire les usages énergétiques. Cette première approche révèle la non autonomie du système qui dépend des dotations naturelles obéissant à des régulations écologiques, et de la transformation des ressources contenue dans les limites physiques du possible (rendements des convertisseurs) afin de satisfaire les besoins en énergie. Cependant, elle ne précise pas clairement le fonctionnement du système énergétique par rapport à la biosphère. Pour cela, il convient de mettre en évidence les principes thermodynamiques relatifs à l'énergie et à la matière au sein du système énergétique.

Les ressources énergétiques relèvent de 2 catégories distinctes : d'un côté, une composante flux, d'un autre côté, une composante stock.

Le stock est un stock de matière-énergie renfermant de l'énergie libre, un potentiel d'énergie chimique. La matière est par essence de nature non homogène : elle est présente sous de multiples formes, chacune d'elles ayant des propriétés, caractéristiques particulières (2). Il est composé des ressources fossiles ou ressources non renouvelables. Ce stock contient : le pétrole, le charbon, le gaz et l'uranium.

Le flux se décompose en deux. Une partie du flux est composée d'énergie seulement. Il s'agit du flux solaire, qui par essence, est parfaitement homogène. Une autre partie du flux de ressources énergétiques est constituée par les formes dérivées du flux solaire. Il s'agit là d'une composition de matière-énergie hétérogène. Cette seconde composante comprend la biomasse, l'hydraulique, l'éolien, l'énergie des vagues.

On formule les hypothèses suivantes concernant la géothermie et l'énergie marémotrice. Compte tenu de son caractère épuisable, la géothermie n'appartient pas à la composante flux des ressources énergétiques. Pour l'énergie marémotrice, elle constitue un flux inépuisable par essence et donc apparaît aux côtés de l'énergie lumineuse (flux solaire) dans

(1) F. RAMADE, *Ecologie des ressources naturelles*, Masson, 1981, p.32-35.

(2) N. GEORGESCU-ROEGEN, "Energy, matter, and economic valuation : where do we stand ?", in H.E. DALY, A.F. UMANA, *Energy, economics, and the environment*, AAAS, Selected Symposium, 1981, p.63.

une moindre mesure.

Il est remarquable de constater que seul le flux solaire a la propriété physique particulière de constituer un flux d'énergie libre sans matière. Le rayonnement solaire ou plus simplement la lumière se définit par référence à une particule fondamentale appelée photon. J.A. TERNISIEN donne la définition suivante du photon : en microphysique, un photon est "un corpuscule d'énergie constitutive du rayon lumineux ayant pour valeur le quantum hf (h , constante de Planck égale à $6,62620 \times 10^{-34}$ Joules par seconde ; f , fréquence en nombre de cycles par seconde) (1).

Un photon par ailleurs est une particule dont la masse est nulle. Le flux solaire est donc libéré sans support matériel. Il est constitué par essence de photons et d'aucune autre particule. C'est de l'énergie dans sa forme la plus pure.

Les autres ressources énergétiques, par contre, sont constituées par de la matière-énergie. La matière est constituée d'un complexe de particules élémentaires (atomes, molécules, cellules biologiques). Elle peut être soit inerte (charbon) soit vivante (biomasse). Nous pouvons résumer ces caractéristiques de la manière suivante :

Caractéristiques des ressources énergétiques

Propriété Composante	Stock	Flux	
ENERGIE		Rayonnement solaire (ou énergie lumineuse)	Nature homogène
MATIERE - ENERGIE	Ressources fossiles	Formes dérivées du flux solaire	Nature hétérogène

Non renouvelable
Renouvelable

Le système énergétique s'est attaché et s'attache encore à mettre à la disposition des activités humaines, l'énergie libre contenue dans les stocks de ressources fossiles. La première étape de la transformation est constituée par le processus d'extraction des ressources. Il nécessite dans sa mise en oeuvre un apport d'énergie mais aussi de matière. L'utilisation

(1) J.A. TERNISIEN, *L'absolu, ses réalités humaines*, CILF, 1989, p.35.

d'équipements pour le forage, support matériel du vecteur technologique, est une manifestation de la nécessité d'un apport de matériaux en provenance des milieux naturels. Ainsi, les ressources minérales sont-elles sollicitées à l'entrée du processus afin de mettre en forme les moyens d'extraire les ressources fossiles. L'énergie nécessaire à l'extraction peut provenir de différentes sources (électricité, produits pétroliers).

Après l'extraction, une seconde étape consiste à transformer la ressource brute à l'aide de différentes technologies, équipements et d'apports énergétiques. Des opérations de raffinage, des transformations multiples peuvent se produire à ce niveau. Enfin, des produits ou services énergétiques sont disponibles pour des usages définis (électricité pour éclairage, électricité pour le transport ...). Là encore, il existe un emploi d'équipements destinés à satisfaire les usages.

Tout au long de cet enchaînement successif, le système énergétique libère des rejets dans les différents milieux naturels composant la biosphère. Un premier type de rejet est constitué par les émissions de substances dans l'atmosphère (NOX, SOX, CO₂, N₂O) ainsi que de particules. Cela se produit au cours des processus d'extraction et de transformation, mais aussi au niveau de la sphère consommation. Un second type est constitué par des déchets de matière-énergie qui vont être stockées (exemple des déchets nucléaires). A ce stade, nous nous situons au niveau du processus de transformation.

Un troisième type de rejet est issu des processus extraction-transformation : il s'agit de l'usure des équipements et de leur retrait des processus. Il s'agit de matière "utilisable dans sa forme inutile" (1). C'est de la matière, encore disponible qui peut donc être recyclée. Selon la dénomination de N. GEORGESCU-ROEGEN, il s'agit de "garbojunk".

Au sein de la sphère consommation, de la matière encore disponible sous cette forme est aussi présente. Elle est relative aux équipements des consommateurs nécessaires pour la satisfaction des besoins énergétiques (automobiles, batteries, ampoules électriques par exemple).

Les "garbojunks" sont composés de matière d'origine minérale (métaux -aluminium, fer...-, verre) ainsi que de matière d'origine organique (papier, carton, caoutchouc, et dérivés organiques tels que les matières plastiques). Ils concernent l'ensemble des secteurs de l'économie, secteurs qui s'efforcent de trouver des solutions efficaces à leur élimination. Parmi ces solutions, le recyclage constitue une voie possible même si peu de "garbojunk"

(1) Se reporter au paragraphe "Entropie et valeur économique de la ressource".

sont aujourd'hui concernés. Dans les années à venir, le recyclage devrait certainement trouver un aura dans les pays industrialisés où les quantités de déchets produits ne cessent d'augmenter. (1)

Nous pouvons représenter par un schéma le système énergétique dans la biosphère. (voir page suivante).

La présentation schématique et globale traduit l'ouverture du système énergétique sur la biosphère. Le système vit de prélèvements directs (ressources énergétiques) et de prélèvements indirects (ressources minérales) dans la biosphère qui ne sont que très partiellement compensés par le recyclage. Ces prélèvements traduisent une diminution de la qualité des gisements et finalement une raréfaction des ressources in situ. Ainsi, pour le cuivre, les teneurs sont passées de 2,1 % en 1925 à 0,3 % en 1974 et pour l'étain de 1,2 % en 1905 à 0,015 % en 1971 (2).

Le système énergétique consiste en l'absorption de ressources de haute qualité et en des rejets de diverses natures tout au long des processus de transformation des ressources. A l'entrée du système, la matière-énergie est dans un état de basse entropie tandis qu'elle est dégradée au sein du système de manière irréversible. L'absorption de l'énergie libre contenue dans les ressources et sa mise en forme, sa structuration en produits ou services diminue l'entropie de la ressource mais au prix d'un accroissement supérieur de l'entropie de la biosphère.

"When we produce a copper sheet from some copper ore we decrease the entropy (the disorder) of the ore, but only at the cost of a much greater increase of the entropy in the rest of the universe" (3).

Le système énergétique est de nature dissipative et est donc non conservatif. Son ouverture sur la biosphère se traduit par une dissipation continue de l'énergie et de la matière, irrévocablement dégradées. Seule une infinie quantité de matière dans sa forme inutilisable va faire l'objet d'un recyclage au sein du système.

Cependant, le recyclage étant partiel - le système énergétique est en effet un système ouvert -, il doit non seulement se nourrir d'énergie mais aussi de matière. C'est la conséquen-

(1) OCDE, *L'état de l'environnement*, 1991, p.157-168. Se reporter aussi au numéro spécial "Le déchet matière" de la revue *Terre vive*, n°2, janvier 1992.

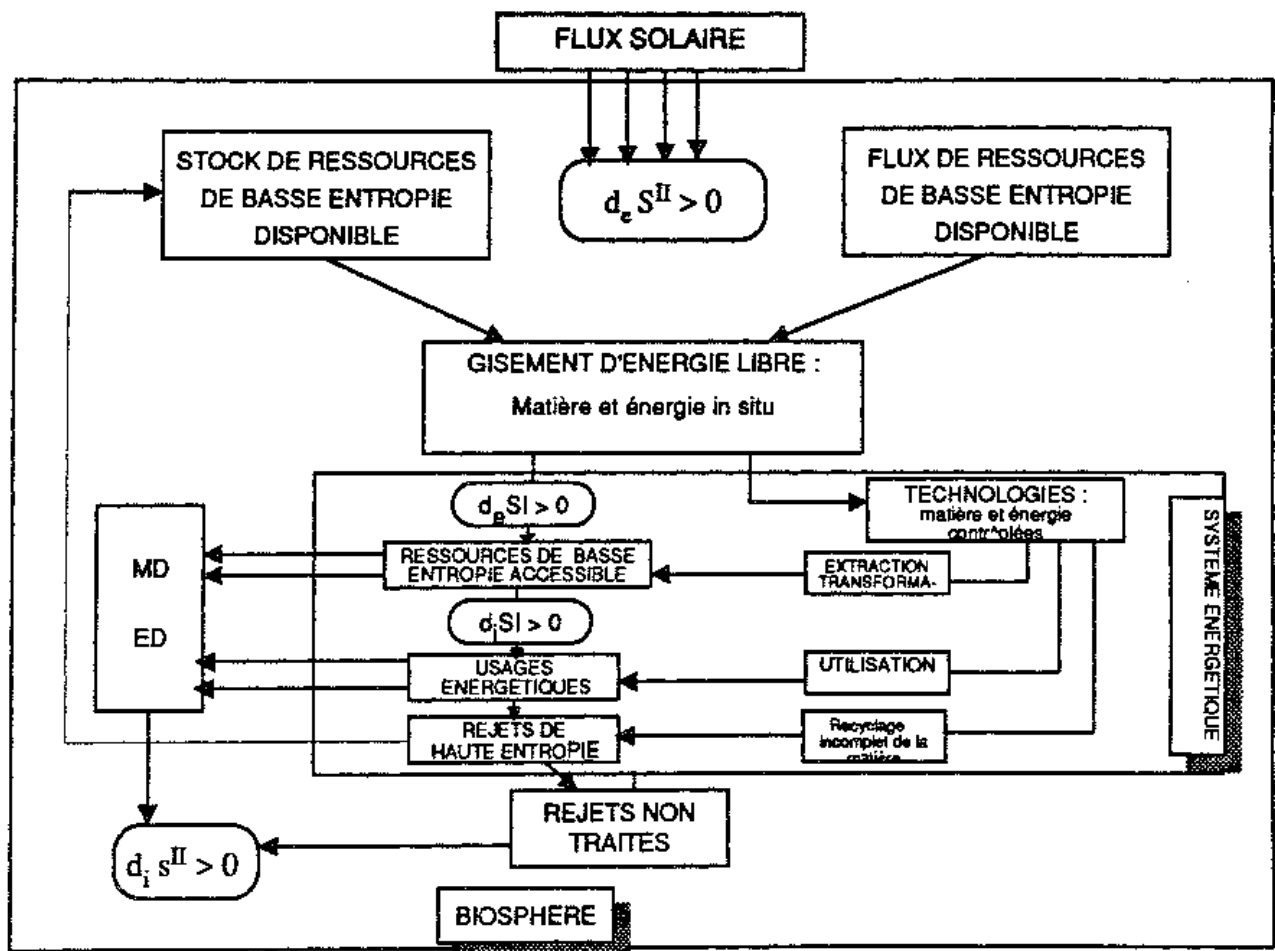
(2) C. GUILLEMIN, "Matières premières minérales et énergétiques : quels enjeux ?", *Futuribles*, juillet-août 1985, p.8.

(3) N. GEORGESCU-ROEGEN, *Energy and economic myths*, Pergamon press, 1976, p.10.

ce de la quatrième loi de GEORGESCU-ROEGEN. La dégradation de la matière implique l'impossibilité au sein du système de recycler totalement la matière dégradée. Or, le système énergétique s'est depuis la civilisation industrielle principalement appuyé sur les ressources de basse entropie terrestres sans se soucier de la dissipation de la matière.

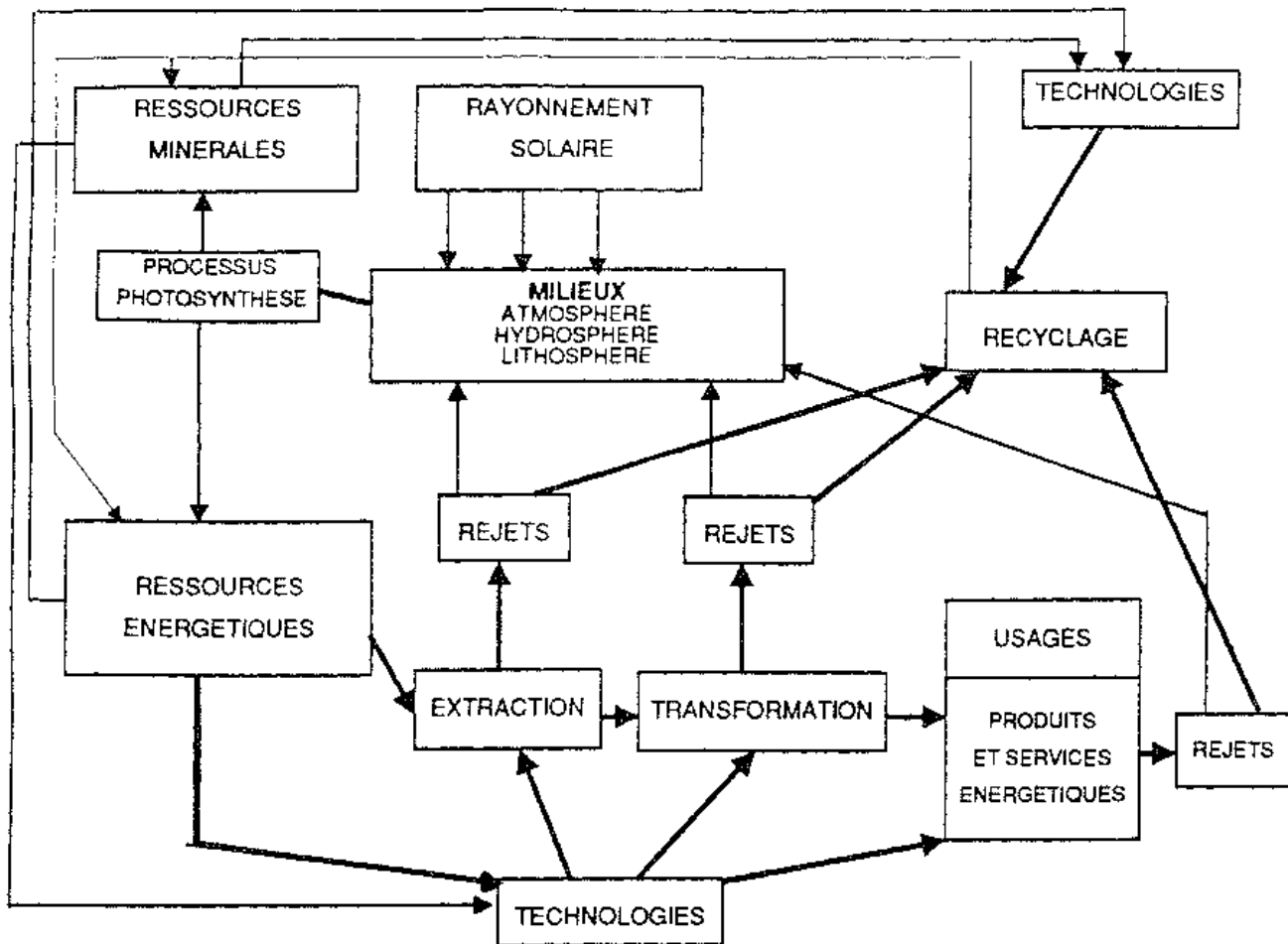
Cet attachement s'est renforcé au fil du développement d'instruments exosomatiques toujours plus puissants, développement fondamentalement enraciné dans le développement humain. Tandis que la biosphère est un système fermé du point de vue de la matière, un gaspillage, une accélération de la destruction de la basse entropie d'origine terrestre se sont produits à cause du fonctionnement du système énergétique que nous connaissons aujourd'hui. Parallèlement, le flux solaire demeure la plus grande source de basse entropie et n'est encore que peu exploitée.

Nous pouvons proposer une représentation du système énergétique plus précise, prenant en compte les lois de la thermodynamique.



SYSTEME GLOBAL S

$$dS = dS^I + dS^{II} > 0$$



LE SYSTEME ENERGETIQUE
DANS LA BIOSPHERE

- ➔ flux dans le système énergétique
- ➔ flux circulant entre le système énergétique et la biosphère

Le système global est constitué de la biosphère (II) et du système énergétique (I) ; (I) est contenu dans (II). Ce sont des parties du système global. Au sein de ces deux systèmes, la loi de la conservation de la matière et la loi de la conservation de l'énergie sont observées. Dans le système global, la masse des ressources potentiellement disponible pour l'extraction est constante. Le gisement d'énergie libre tel que nous le définissons est constitué par la matière et l'énergie contenues dans les stocks et les flux de ressources disponibles pour le système énergétique. Sa nature est soit de l'énergie chimique stockée soit de l'énergie lumineuse sous forme de flux, soit enfin des minéraux (ressources minimales).

Concernant la loi d'entropie, au niveau du système énergétique, on observe deux variations ou flux distincts : $d_e S_I$ et $d_i S_I$.

Nous savons que : $dS_I = d_e S_I + d_i S_I$

Le premier terme est le flux d'entropie lié aux échanges de matière-énergie avec la biosphère. Il est positif puisque le système énergétique prélève des ressources de basse entropie. Le second terme est le flux d'entropie lié aux modifications à l'intérieur du système énergétique. Si nous supposons qu'il existe un processus irréversible, alors $d_i S_I$ est positif. Par exemple, c'est le cas du raffinage d'une ressource ou de l'élaboration d'un produit énergétique (produits pétroliers). Le cas des déchets nucléaires ou les émissions de CO₂ libérées par combustion sont d'autres exemples.

Concernant le niveau de la biosphère, deux flux sont présents : $d_e S_{II}$ et $d_i S_{II}$

On a : $dS_{II} = d_e S_{II} + d_i S_{II}$

Le premier terme est le flux d'entropie lié à l'échange d'énergie seulement avec l'univers. Il est positif puisque le rayonnement solaire est intercepté à la surface de la terre, il pénètre dans la biosphère, plus précisément dans l'atmosphère.

Le second terme est le flux d'entropie lié à des modifications à l'intérieur de la biosphère. Nous considérons qu'il existe des processus multiples irréversibles et donc que ce terme est aussi positif. Nous pouvons citer les transferts d'énergie au niveau des réseaux trophiques comme un exemple majeur d'irréversibilité.

Comme l'entropie est une propriété extensive, l'entropie totale au sein du système global est égale à la somme des entropies des sous-systèmes.

D'où on note : $S = S_I + S_{II}$ et

$dS = dS_I + dS_{II} > 0$

Le système énergétique, en tant que système ouvert et dissipateur participe à l'évolution entropique de la biosphère. Son enracinement dans un système physique réel avec lequel des échanges de matière et d'énergie ont lieu le soumet aux lois de la thermodynamique. L'énergie et la matière sont irrévocablement dissipées.

Son évolution est étrangère à celle d'un système mécanique : la loi d'entropie, loi fondamentale dans notre approche, l'oriente vers une dégradation irréversible que rien ne semble compromettre.

Son irréversibilité et sa dépendance à l'égard du temps sont deux caractéristiques essentielles de ce processus thermodynamique particulier. Le système énergétique n'échappe pas non plus aux principes écologiques relatifs à la nature des ressources vivantes et inanimées.

Nous allons à présent mettre en évidence les principes écologiques essentiels du point de vue de notre approche entropique. Nous verrons alors que le système énergétique est un système évolutif d'essence organique et non mécanique.

§ 2 - Un système d'essence organique

La prise en compte des principes relatifs à l'écologie permet de situer dans le temps et dans l'espace leurs implications sur le système énergétique. Ces principes établissent des limites au fonctionnement du système que nous ne pouvons ignorer encore longtemps. Dans l'évolution du système énergétique depuis le néolithique, l'utilisation intensive du stock de ressources accessibles et le développement de technologies plus complexes pour maîtriser l'énergie se sont opérés dans l'ignorance la plus totale des principes écologiques qui régulaient les ressources énergétiques et minérales en quantité limitée. Leur raréfaction progressive s'est traduite par une dégradation croissante (variation de la teneur) du fait de la loi d'entropie (raréfaction qualitative avec épuisement des ressources de basse entropie), phénomène accentué par la non prise en compte des régulations écologiques.

Mais voyons à présent les principes écologiques essentiels pour le système énergétique. Les principes de la thermodynamique ont mis en évidence l'importance des flux d'énergie et de matière au sein des systèmes ainsi que des échanges avec le milieu. Les principes écologiques, en prenant en compte l'énergie et la matière, se sont intéressés à trois autres variables : le temps, l'espace et la diversité. Nous nous référons ici aux travaux de Kenneth E.WATT déjà présentés (1).

Le temps est une ressource, au sens de WATT, qui permet à l'homme de mettre en oeuvre de nouvelles technologies, toujours plus nombreuses et complexes, destinées à satisfaire les besoins énergétiques. La ressource est définie ainsi : "a ressource is anything needed by an organism, population, or ecosystem which, by its increasing availability up to an optimal or sufficient level, allows an increasing rate of energy conversion" (2).

Les substitutions énergétiques qui se sont succédées au cours des siècles se sont inscrites dans la durée tout comme les rejets du système énergétique se sont peu à peu accumulés, sans qu'ils n'aient été jamais recyclés. L'espace est de ce fait concerné par ces déchets non recyclés mais aussi par l'accumulation des rejets de gaz carbonique ou encore d'oxydes d'azote. La diversité s'est trouvée remise en cause avec l'exploitation majeure du stock de ressources fossiles, alors que le flux solaire était délaissé.

(1) Se reporter au chapitre précédent, "La thermodynamique et les sciences humaines".

(2) K.E.F. WATT, *Principles of environmental science*, Mc Graw-Hill, 1973, p.20.

Mais ces trois variables ne sont pas indépendantes : tout comme elles dépendent de l'énergie et de la matière, elles dépendent aussi les unes des autres. Ainsi, le principe stipulant que ces 5 variables constituent des ressources, implique l'idée suivante : "the availability of resources determines the carrying capacity of an environment for a population" (1). Or, la dépendance à l'égard des ressources de stocks exprime, compte tenu de la loi d'entropie, une disponibilité décroissante de ces ressources dans un environnement fini. Finalement, "the carrying capacity" ou capacité de charge est une limite supérieure fixée déterminée par la disponibilité d'une ressource.

Un autre principe important est le principe de saturation qui stipule que pour chaque ressource, il existe un niveau optimum de la disponibilité de la ressource. Autrement dit, il existe des effets ou facteurs de saturation qui limitent les processus à cause de la disponibilité finie des ressources. Un facteur de saturation est par exemple la pollution libérée par la combustion des ressources fossiles. Il peut à terme constituer une limite à l'utilisation de telles ressources. Un taux de prélèvement trop important sur les stocks de ressources est également un autre facteur qui conduit à l'épuisement à long terme des ressources en quantité limitée. Ce principe est important car il traduit la capacité limitée du système énergétique, système fonctionnant grâce aux échanges de matière et d'énergie avec la biosphère. Il met en évidence l'existence de seuils au delà desquels la disponibilité d'une ressource n'implique plus une amélioration de sa productivité. L'accroissement de la disponibilité d'une ressource n'est pas infinie. La disponibilité dépend de la productivité du système énergétique. Elle est donc conditionnée par l'efficacité des transformations qui s'opèrent au sein du système. Nous arrivons donc à prendre en compte les technologies de transformation qui caractérise l'accessibilité d'une ressource tout au long des processus successifs - de l'extraction au recyclage des rejets.

En économie, la loi des rendements décroissants illustre ce phénomène (cas par exemple de l'évolution non proportionnelle du rendement d'une culture et de l'apport d'engrais). Une autre illustration au niveau technologique est fournie par la limite supérieure du coefficient de Carnot. Tout rendement réel est en fait très en deçà du rendement théorique.

Toute amélioration nécessite une augmentation plus que proportionnelle de la consommation d'énergie. Il existe donc une limite absolue au rendement des techniques d'extraction

(1) K.E. WATT, opus cité, p.140.

The carrying capacity C , $C = \frac{W \cdot p}{3/2}$, W est le poids moyen des individus ou végétaux dans une population et p , la densité de population. On l'appelle aussi "capacité de charge". Elle désigne le nombre d'espèces pouvant être supporté par l'environnement naturel.

et de transformation des ressources (1). Une croissance continue et indéfinie de la disponibilité des ressources constitue un mythe ; cette assertion en effet viole le principe stipulé.

Un autre principe écologique est exprimé en terme d'efficacité énergétique dont la faiblesse ou l'inefficacité apparaît dans les sociétés en terme de pollution, de problèmes de transports et d'épuisement des ressources. Comme le précise à juste titre GEORGESCU-ROEGEN, seule l'efficacité économique a eu et a encore une importance dans nos sociétés ; c'est le rendement économique qui implique le rendement énergétique et non l'inverse (2). Au niveau des moyens de transport, il est tout de même étonnant de constater que l'automobile s'est imposée malgré les rendements médiocres relatifs aux moteurs et des pollutions qui en résultent. Barry COMMOMER a classé les moyens de transports selon leur efficacité énergétique. Il ressort de son étude que l'automobile est le moyen de transport dont l'efficacité énergétique est la plus faible (3).

Nous mentionnerons enfin un dernier principe écologique essentiel pour notre étude. Il s'agit de la loi de Liebig qui concerne le manque d'une ressource particulière qui pourrait alors constituer un facteur limitant dans l'utilisation d'une autre ressource.(4) L'emploi d'instruments exosomatiques destinés à transformer les ressources énergétiques traduit la dépendance forte à l'égard des ressources minérales. La raréfaction de celles-ci exprimée à travers la diminution de la teneur des minerais peut remettre en cause la satisfaction de besoins énergétiques croissants ; surtout si l'on prend en compte la dissipation de la matière irréversible (recyclage incomplet). Cela traduit l'importance de la matière au sein du système énergétique. Il faut noter ici la différence essentielle entre les écosystèmes naturels où il y a recyclage parfait de la matière (système fermé) et le système énergétique où le flux de matière provenant de la biosphère l'alimente en permanence (système ouvert).

La structure du système énergétique et ses "fondements écologiques" au regard des principes énoncés font de lui un système ouvert vivant de cette ouverture sur la biosphère.

(1) Se reporter au paragraphe "Entropie et rareté de la ressource".

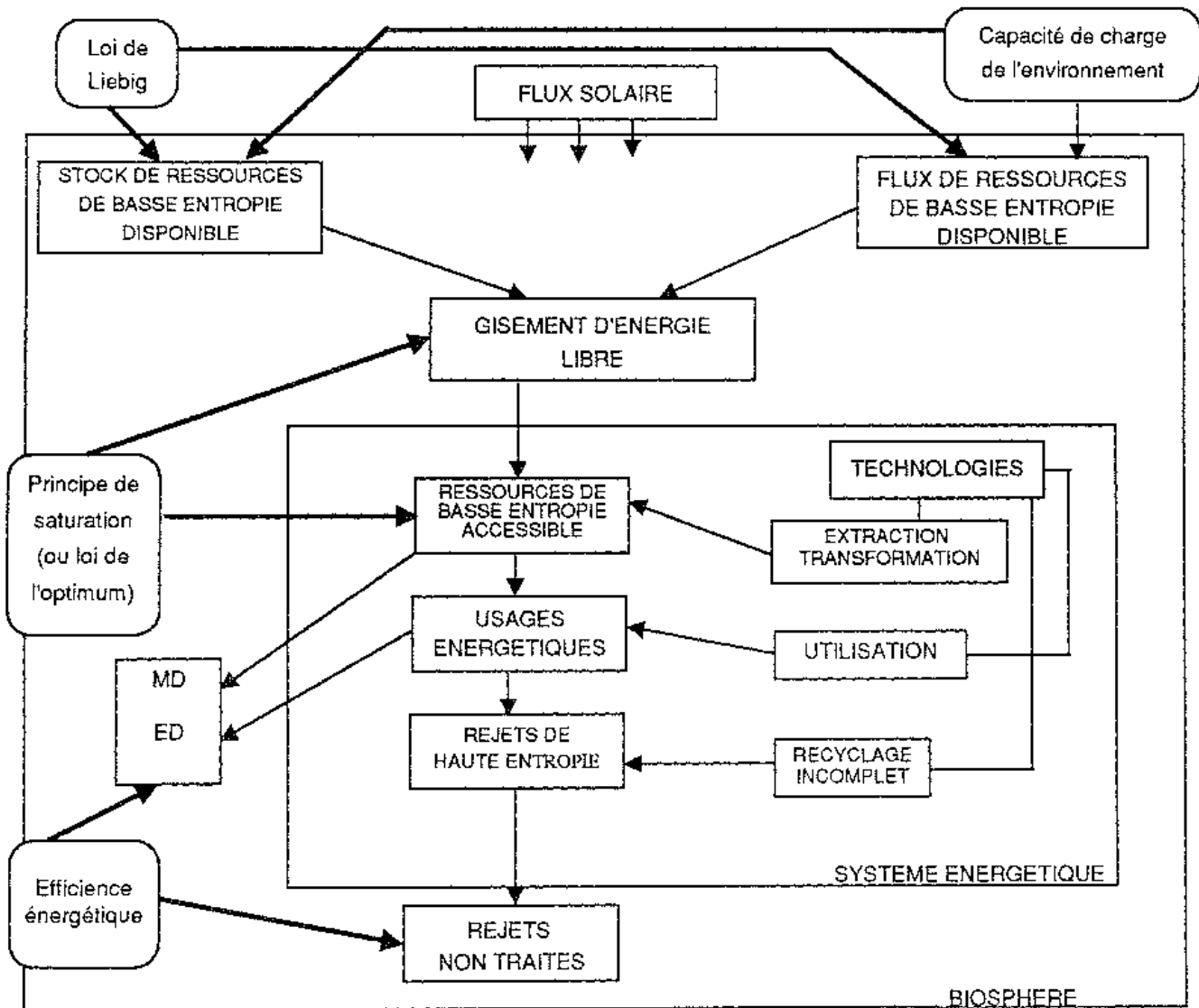
(2) N. GEORGESCU-ROEGEN, *Demain la décroissance*, Ed. P-M Favre, 1979.

(3) D'après J-C DEBEIR, J-P DELEAGE, D. HEMERY, *Les servitudes de la puissance*, Flammarion, 1986, p.2..

(4) La prise en compte de ce principe écologique remet sérieusement en cause la thèse de Nordhauss. Se reporter au chapitre 3 de la thèse.

Les modes de régulation qui gouvernent la biosphère sont donc nécessairement à prendre en compte si l'on souhaite s'acheminer vers un système énergétique viable à long terme compte tenu des évolutions des besoins énergétiques et des moyens de les satisfaire. Le système énergétique dans son fonctionnement s'accompagne non seulement d'une dégradation de l'énergie mais aussi de la matière ; il est donc caractérisé par l'irréversibilité.

Aux côtés des implications des lois de la thermodynamique, les principes présentés relatifs à l'écologie et au maintien des écosystèmes constituent des contraintes du système énergétique. Ils établissent ainsi des limites naturelles. Si nous reprenons la représentation du système global, nous pouvons faire figurer les principes écologiques.



Les principes écologiques et le système énergétique

Nous voyons l'importance de ces principes par rapport au système énergétique.

Le principe de saturation mérite une attention particulière. C'est en effet ce principe qui permet de préciser dans quelle mesure le système énergétique est arrivé à sa limite supérieure. Dans la mesure où les ressources disponibles deviennent des ressources accessibles grâce aux technologies, la productivité du système énergétique va s'exprimer en terme de rendement des transformations ; en terme d'efficacité de ces transformations. Comme la disponibilité des ressources diminue, on peut s'interroger sur l'efficacité du système énergétique. En d'autres termes, l'idée de rendements décroissants de la technologie est peut être à considérer pour l'avenir.(1) Au niveau global, une baisse de l'efficacité se traduit par des rejets importants d'oxydes de carbone et de soufre issus de la combustion des ressources fossiles.

Le système énergétique que nous connaissons, en laissant une place prépondérante aux ressources non renouvelables, joue donc un rôle majeur dans l'évolution des équilibres de la biosphère. Dans ce cas, une issue à la diminution des stocks de ressources de basse entropie disponible et à une faible efficacité des techniques utilisées aujourd'hui au sein du système énergétique, réside dans le développement de sources abondantes de basse entropie et dans l'amélioration des transformations énergétiques. La prise en compte de ces deux solutions sera largement développée ultérieurement. Précisons simplement que ces deux facteurs peuvent accorder une plus grande souplesse au système énergétique, et donc relâcher la contrainte relative au principe de saturation.

Nous terminerons ici l'exposé en insistant sur la nature organique - par opposition à mécanique - du système énergétique telle qu'elle nous a été révélée à travers les principes thermodynamiques et écologiques. En tant que processus dépendant du temps et soumis à l'irréversibilité des dégradations (énergie et matière), le système énergétique est un système non autonome. Cette absence d'autonomie se traduit par son ouverture sur l'environnement qui le contient et la nécessité de maintenir des échanges permanents avec lui. Le système énergétique implique donc des changements au niveau du système global. Les régulations s'opérant au sein de la biosphère sont concernées ici.

L'objet de la section suivante est de préciser les contours des effets du système énergétique sur la biosphère ainsi que les réponses des mécanismes régulant les équilibres au sein des cycles biogéochimiques au moyen d'une approche systémique. Cette approche nous est apparue intéressante pour comprendre ces différents phénomènes et saisir leur importance respective relativement aux implications globales et futures.

(1) GIARINI O., LOUBERGE H. , *La civilisation technicienne à la dérive*, Dunod, 1979.

Section 2 - L'Intérêt d'une approche systémique

§ 1 - Les mécanismes de régulation : champs d'action et limites

Les relations entre le système énergétique et la biosphère et les implications sur leur fonctionnement justifient le recours à une approche systémique. Le système global peut être appréhendé comme un système complexe dans la mesure où un grand nombre d'éléments sont en interaction et où on observe une grande diversité des éléments de nature hétérogène. Cinq concepts essentiels pour qualifier et caractériser le système global seront ici utilisés : complexité, totalité, interaction, organisation et finalité. (1)

L'approche systémique est l'approche - ou moyen d'appréhender les faits - qui relève de ces différents concepts. Le point de départ de l'analyse est la prise en compte du "tout", de la totalité que nous identifions à la biosphère. Le système énergétique n'est qu'un sous-ensemble ouvert sur la biosphère. Il est donc un sous-système particulier identifié par une frontière et des composants ou éléments, composants caractérisés par des relations particulières dans le système énergétique et au dehors de lui. Finalement, nous allons partir de la finalité du tout pour saisir comment cette finalité orchestre l'organisation des éléments qui le constituent.

L'objet de la biosphère est d'assurer son maintien et sa pérennité à l'aide de mécanismes régulateurs opérant au niveau du cycle de la matière et au niveau des flux d'énergie circulant dans les écosystèmes. Les interdépendances entre la biosphère et le système énergétique s'expriment par des flux d'échange permanents de matière et d'énergie. Ces relations particulières interviennent à différents niveaux d'organisation de la matière. Au coeur de ces relations, les lois de la thermodynamique et les principes écologiques assurent la pérennité de la biosphère, ainsi que du sous-système énergétique.

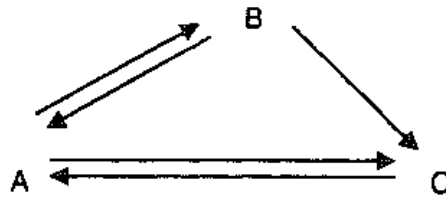
Nous allons préciser ici les principaux éléments du système énergétique qui interviennent au sein de la biosphère en tenant compte des implications de ces changements sur la finalité de la biosphère et des capacités d'adaptation de celle-ci et aussi du système énergétique.

Le système énergétique ne peut être isolé de son environnement, c'est à dire de la biosphère. Cela signifie qu'il n'est pas autonome. Cette propriété est fondamentale pour

(1) E. MORIN, *La méthode, La nature de la nature*, Seuil, p.123-126.

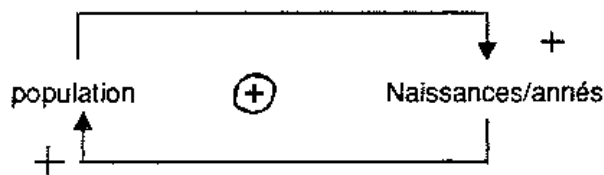
la détermination des frontières du système.

La biosphère qui contient le système énergétique est du point de vue thermodynamique un système fermé sur l'univers, qui n'échange que de l'énergie et pas de matière. Les relations de causalité entre l'univers et la biosphère sont unidirectionnelles. Par contre, à l'intérieur du système, les relations de cause à effet sont structurées à l'aide de boucles de rétroactions. Une boucle de rétroaction est une chaîne fermée de relations causales. Elle exprime donc l'existence d'interactions entre les variables d'un système.



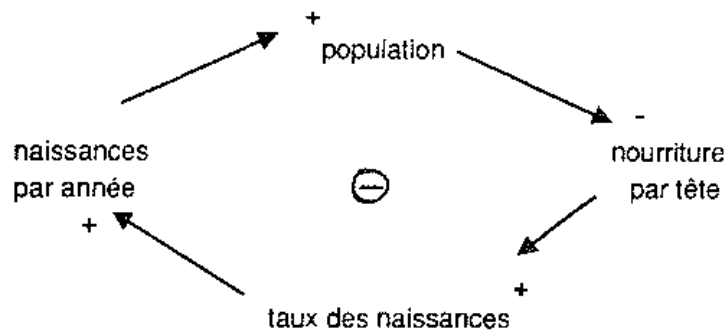
Exemple de structure causale avec des chaînes fermées de rétroaction

Des variations à la hausse ou à la baisse de l'une des variables détermine des variations sur les autres variables, soit directement, soit indirectement. Les rétroactions ou feed-back sont de deux types différents. Ils sont soit amplificateurs soit compensateurs. Un feed-back amplificateur qui se traduit par une boucle de rétroaction positive est une rétroaction qui renforce un déséquilibre initial. Un exemple est fourni avec la croissance d'une population (1).



Au contraire, un feed-back compensateur se traduit par une boucle de rétroaction négative et exprime une rétroaction qui tend à rétablir la situation qui prévalait avant le déséquilibre. Un exemple est la limitation de la croissance d'une population compte tenu de la disponibilité alimentaire :

(1) J. ARACIL, *Introduction à la dynamique des systèmes*, Presses universitaires de Lyon, 1984, p.46-47.



L'existence de feed-back compensateurs est à l'origine des mécanismes d'homéostasie qui s'opèrent au niveau de la biosphère, mécanismes représentant les conditions de survie de ce système complexe. Ils assurent sa permanence (1). Ils traduisent la capacité d'adaptation ou réponse du système lorsqu'une perturbation intervient. Pour notre propos, nous ne retiendrons que les perturbations d'origine humaine relatives aux activités énergétiques ; il faut cependant savoir que des perturbations d'origine naturelle existent et sont à l'origine de changements dans les écosystèmes (sources internes).

Un système global de régulation est au cœur du fonctionnement de la biosphère, système qui contient une pluralité de mécanismes de régulations opérant à différents niveaux d'organisation de la matière (végétaux, animaux). Ces différents niveaux sont organisés de manière hiérarchique au sein des chaînes alimentaires : il s'agit là des différents niveaux trophiques et de leur rôle dans la circulation des flux énergétiques. Du niveau des végétaux à celui des carnivores, la complexité des mécanismes de régulation est croissante du fait d'un nombre d'interactions considérables entre de nombreux éléments (cellules).

L'homéostasie est une propriété fondamentale qui accorde une liberté d'adaptation non pas totale mais contenue dans les limites des buts des objectifs que la biosphère doit satisfaire (constance de la température à l'échelle du globe, constance des éléments chimiques au sein des cycles biogéochimiques). Elle permet le maintien de la structure de la biosphère grâce à des équilibres dynamiques contrôlés par des mécanismes de régulation interdépendants. Les équilibres dynamiques se traduisent par des flux qui circulent à l'intérieur de la biosphère, flux d'énergie et de matière. L'homéostasie n'est cependant possible que grâce à une grande variété de régulations.

Un grand nombre de mécanismes de régulation implique la présence de nombreux élé-

(1) R. PASSET, *L'économie et le vivant*, Payot, 1979, p.60.

ments dans le système, de nombreuses relations entre eux. La variété du système qui nous le verrons plus loin est une propriété essentielle pour la stabilité du système, est donc nécessaire pour assurer l'homéostasie ; elle est aussi nécessaire pour assurer la survie dans le temps de la biosphère.

Nous ne pouvons pas parler d'homéostasie et de mécanismes de régulation sans présenter l'hypothèse Gaïa de J. LOVELOCK (1). Cette hypothèse suppose l'existence d'une régulation homéostatique au niveau de la planète. Gaïa se définit "comme une entité complexe comprenant la biosphère terrestre, l'atmosphère, les océans et la terre ; l'ensemble constituant un système de feed-back qui recherche un environnement physique et chimique optimal pour la vie sur cette planète. La préservation de conditions relativement constantes par un contrôle actif pourrait être décrit de manière satisfaisante par le terme "homéostasie" (2).

L'hypothèse Gaïa est incontournable pour les tenants de l'écologie globale ; nous verrons au chapitre suivant l'approche de l'écologiste C.S. HOLLING et ses enseignements majeurs. L'acceptation de cette hypothèse suppose donc une autorégulation planétaire. De nombreuses boucles de rétroaction négatives interviennent et régulent les climats, la température terrestre, ou encore la composition chimique de l'atmosphère afin de maintenir la vie sur la planète. On peut remarquer la constance de la température terrestre malgré une augmentation de 25 % de l'ensoleillement ou encore le maintien à 21 % de l'oxygène atmosphérique, niveau qui rend optimal le métabolisme aérobie (3). Ainsi, l'ensoleillement solaire intensifie l'évapo-transpiration d'une forêt. Cependant, la couverture nuageuse qui en résulte opère un barrage au rayonnement solaire générateur de l'effet thermique. La boucle régulatrice est donc bouclée. L'observation de feed-back compensateur au niveau de la biosphère révèle les logiques de fonctionnement du système global : il fonctionne comme un organisme vivant. L'ouverture sur le flux solaire et non sur le flux de matière de l'univers, la circulation de l'énergie et de la matière et les cycles non linéaire au sein desquels des régulations par rétroaction négatives s'opèrent, témoignent de l'organisation complexe de la totalité afin de maintenir les équilibres nécessaires à la vie. Or, il est clair dès lors que toute infraction à la règle remet en cause les mécanismes régulateurs à moment donné.

(1) J.E. LOVELOCK, *La terre est un être vivant*, Ed. du rocher, 1986. Le terme biosphère désigne le système écologique global de la terre.

(2) J.E. LOVELOCK, opus cité, p.32.

(3) C.S. HOLLING, "the resilience of terrestrial ecosystems : local surprise and global change", in W.C. CLARK, R.E. MUNN, *Sustainable development of the biosphere*, Cambridge university press, 1986, p.293.

L'activité du système énergétique a engendré des crises ou ruptures de régulation à différents niveaux qui semblent persister et donc traduire l'incapacité à rétablir l'équilibre antérieur pour la biosphère. L'hypothèse Gaïa a pris en compte ces ruptures et n'est pas, comme nous pourrions le penser, une solution aux pollutions et aux déséquilibres. Si un système pourvu de mécanismes régulateurs homéostatiques peut supporter des écarts par rapport à son état d'équilibre, cela suppose de rester à l'intérieur des capacités de régulation. Le système peut donc être menacé par une perturbation trop forte qui l'empêcherait d'opérer une quelconque régulation (1).

Les activités énergétiques ont pour conséquences de perturber les régulations intervenant au niveau des cycles du carbone, de l'azote et du soufre et de participer de manière importante au réchauffement de l'atmosphère ou encore à l'accroissement de la teneur atmosphérique en CO₂ (2). Les manifestations de ces ruptures s'observent en différents points du système énergétique :

- au niveau des rejets non visibles : il s'agit des émissions d'oxydes d'azote et de soufre ainsi que de gaz carbonique. La menace directe concerne l'équilibre thermique de la biosphère, les équilibres des écosystèmes terrestres et aquatiques. (3)
- au niveau des rejets visibles : il s'agit de déchets non biodégradables et non recyclés au sein du système : ensemble des déchets nucléaires stockés, matériaux inutilisables mis au rebut et autres formes inutilisables de déchets matériels liés aux usages énergétiques.

Les principaux éléments mis en jeu dans les interactions entre le système énergétique et la biosphère peuvent être présentés de la manière suivante :

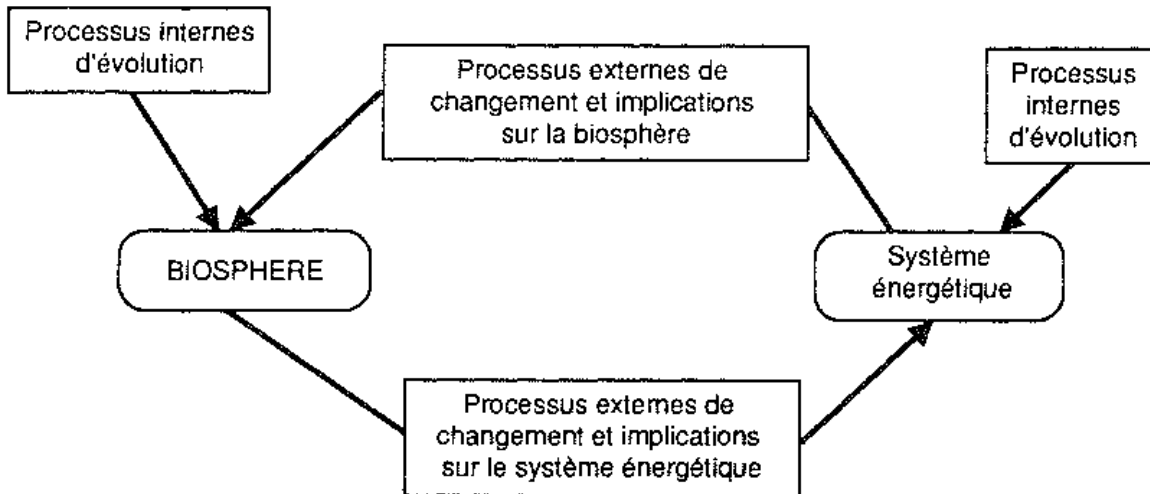
- d'un côté, chaque système va évoluer sous l'effet de sa propre dynamique interne et de perturbations extérieures,
- d'un autre côté, chacun va se modifier sous l'effet des interactions mutuelles.

(1) J.E. LOVELOCK, opus cité, 1986, p.176.

(2) Se reporter au chapitre "Le système énergétique et la biosphère", plus précisément aux paragraphes 2 et 3, section 1.

(3) Par exemple, les processus d'eutrophisation provoqués par un excès de matières nutritives (azote, phosphore) conduisent à la destruction de mécanismes naturels d'auto-épuration et d'espèces animales.

Les interactions système énergétique - biosphère



Au niveau des processus internes comme des processus externes, une notion importante est à considérer : c'est la coévolution, c'est à dire l'évolution associée à l'interdépendance (1). Une composante quelconque de la biosphère ou du système énergétique est en relation réciproque avec une autre composante : relation proie-prédateur au sein de la biosphère, relation énergie-matière au sein du système énergétique. La coévolution intervient aussi entre les deux systèmes : le système énergétique dépend des dotations physiques contenues dans la biosphère et ces prélèvements affectent les mécanismes naturels de régulation ; les dérèglements qui en résulte rétroagissent sur le système énergétique. Il en va de même pour les rejets non recyclés et les émissions de substances chimiques qui s'accroissent inexorablement.

Compte tenu de l'observation d'un certain nombre d'indicateurs, il apparaît que l'évolution de la biosphère s'explique plus par des processus externes que des processus internes (2). De plus, des feed-back amplificateurs jouent un rôle notable et déstabilisent ainsi le système global. L'effet de tels processus externes (extraction des ressources fossiles surtout) est de traduire les limites des capacités d'adaptation de la biosphère où jouent des processus internes tels les mécanismes de régulation.

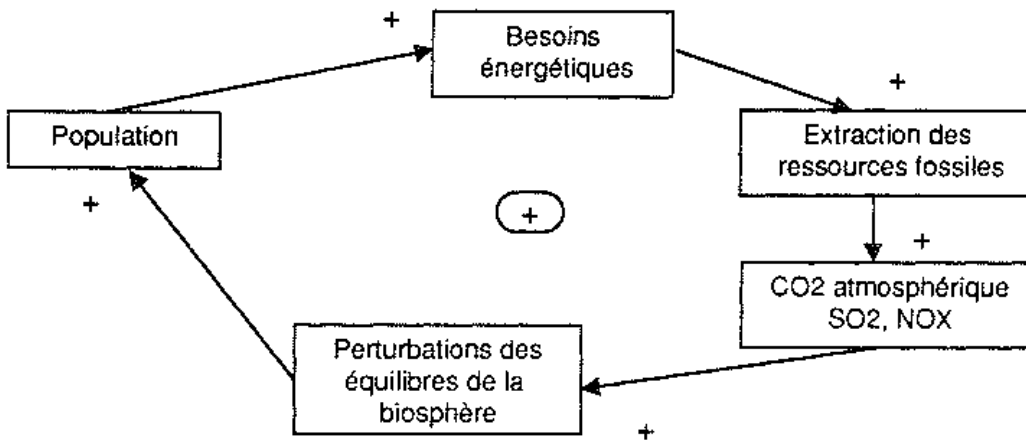
La biosphère est de plus en plus mise à contribution pour satisfaire les besoins énergétiques et donc semble soumise aux règles d'un système énergétique qui ignore les princi-

(1) R. PASSET, "Prévision à long terme et mutation des systèmes économiques", *Revue d'économie politique*, n°5, 1987, p.546.

(2) Se reporter au chapitre "le système énergétique et la biosphère", paragraphe 2 de la section 1. Voir notamment le graphique représentant l'évolution de la production d'énergie et celle des rejets d'oxydes de soufre.

pes et régulations écologiques les plus élémentaires !

La consommation croissante d'énergie a contribué considérablement à l'apparition de déséquilibres au sein de la biosphère sans qu'aucun processus internes ne parviennent à les compenser.



Une logique de croissance destructrice :

Le système énergétique et la biosphère, passé et présent.

Pour le siècle prochain, l'accroissement de la teneur en CO2 dans l'atmosphère va se poursuivre ... jusqu'où ?

Cette logique de croissance infinie traduit un phénomène d'amplification majeur, un déséquilibre qui est un effet d'amplification. La concentration en CO2 s'accroît alors que la durée de vie du CO2 est de sept années. Il existe un risque donc de dépasser un seuil critique, seuil à présent non connu par les spécialistes.(1) Cela signifie le dépassement d'un point critique qui mettrait en cause la survie de la biosphère.

Un autre phénomène à prendre en compte dans les interactions entre biosphère et système énergétique est l'échelle de temps. Certaines interactions ne commencent à compter que sur plusieurs décennies, voire plusieurs siècles.

C'est le cas pour le CO2 atmosphérique. Cela implique alors d'avoir une perspective glo-

(1) La communauté scientifique considère que le seuil de danger se situe autour d'une valeur de 600 ppm. D'après B. DESSUS, "Energie-développement-environnement-, un enjeu planétaire au 21ème siècle, *Revue de l'énergie*, nov. 1989, p.990.

bale à long terme (1).

Partant de ce constat, nous allons à présent étudier l'évolution à venir du système énergétique compte tenu des contraintes écologiques et thermodynamiques, et des interactions avec la biosphère (rôle des processus externes de changement).

(1) W.C. CLARK, "L'écologie humaine et les changements de l'environnement planétaire", *Revue internationale des sciences sociales*, août 1989, p.352-353.

§ 2 - Une représentation du système global

Le fonctionnement du système énergétique nous apparaît en contradiction totale avec celui de la biosphère ; il nie l'existence de modèles biologiques. Alors que la biosphère révèle un ordre naturel (1) obéissant aux lois de la thermodynamique (principe d'évolution) et aux lois de rétroaction (principe de régulation assurant sa pérennité), le système énergétique, sous-système qui aurait dû prendre en compte l'environnement physique auquel il appartient, a développé une autre logique de fonctionnement de nature mécanique et non organique.

Nous allons présenter une redéfinition du système global et des processus internes et externes d'évolution en retenant le concept central de coévolution car il apparaît essentiel de prendre en compte les interdépendances évolutives entre le système énergétique et la biosphère.

En reprenant les principes thermodynamiques et les principes écologiques avec comme grille d'analyse l'approche systémique, nous pouvons définir les caractéristiques du système global que nous appellerons biosystème. Un biosystème est un système qui vit de son ouverture : les systèmes vivants sont des biosystèmes.

(1) J.A. TERNISIEN donne la définition suivante : "système ordonné de l'univers et de la vie. "En intervenant scientifiquement sur les fondements de l'ordre naturel, l'homme concepteur s'est chargé de responsabilités croissantes qu'il n'avait pas héritées naturellement et se trouve, en conséquence, face à des problèmes nouveaux qui font appel, pour leur éventuelle résolution, à la conscience profonde de l'humanité vivante, laquelle devra dorénavant, en rechercher et définir les bonnes solutions", L'absolu, CILF, 1989, p.168.

Les systèmes vivants et non vivants se différencient notamment sur les points suivants :

Système non vivant

Système vivant

STRUCTURE

Faible information

Information (néguentropie) élevée

Entropie élevée

Entropie faible

Système simple

Système complexe

FONCTIONNEMENT

Processus linéaires, loin de
l'équilibre

Processus cycliques
proche de l'équilibre

(sens unique : de l'extraction

(chaînes alimentaires)

des ressources aux rejets dans

le système énergétique actuel)

DYSFONCTIONNEMENT

Rétroactions positives (= amplificatrices)

Rétroactions négatives (= régulatrices)

Source : d'après P. LEBRETON, "Logiques du vivant", *SEBES*, Novembre 1990

Au niveau du biosystème, l'entropie et sa variation dans le temps proviennent de deux sources ; l'une est liée aux échanges de matière et d'énergie avec l'extérieur, l'autre est liée aux modifications à l'intérieur du système lui-même.

Nous savons que la variation totale d'entropie est la somme des variations d'entropie relatives au système énergétique et à la biosphère. La présence de rejets au sein du biosystème-

me traduit son entropie. Leur accumulation dans le temps et dans l'espace traduit l'incapacité à absorber et dégrader les matériaux ou les substances chimiques qui les composent. Les rétroactions positives l'emportent sur les rétroactions négatives.

L'accroissement d'entropie du biosystème est généré par la domination de processus d'évolution externes à la biosphère et orientés par les activités énergétiques ; ces processus ont pour caractéristiques de s'accompagner de feed back amplificateurs qui augmentent le flux d'entropie de la biosphère de manière absolue.

Pour repérer les interactions entre biosphère et système énergétique, nous pouvons mettre en évidence les variables clés intervenant au niveau des processus internes d'évolution et des processus externes de changement. (voir page suivante)

Les variables "population" et "technologie" jouent un rôle non négligeable au sein des processus externes affectant la biosphère et orientent ainsi fortement son évolution. Ces processus externes de changement trouvent leur origine dans le fonctionnement même du système énergétique.

Le point de départ réside dans l'observation du fonctionnement du système énergétique. Il puise dans la biosphère des ressources de haute qualité -faible entropie- afin de les transformer successivement le long de différents processus technologiques. La finalité du système est la maîtrise de l'énergie libre qu'elles contiennent pour satisfaire des usages énergétiques. Cette maîtrise passe par la technologie.

Nous pouvons donc considérer que le système énergétique est un système qui produit une quantité de travail physique de manière irréversible grâce aux technologies de transformations. La productivité maximale du système correspond donc à la quantité de travail maximum que le système peut produire à partir d'un flux d'énergie donnée. Cette quantité s'appelle l'exergie.

Elle s'écrit :

$$EX = U + PV - TS \quad (1)$$

où U, P, V, T et S sont respectivement l'énergie interne, la pression, le volume, la température absolue et l'entropie.

On peut écrire aussi : $EX = H - TS$ où H est l'enthalpie du système ($H = U + PV$). Dans ce cas, on définit la fonction de GIBBS (ou enthalpie libre).

	BIOSPHERE	SYSTEME ENERGETIQUE
PROCESSUS INTERNES D'EVOLUTION	<ul style="list-style-type: none"> - écosystèmes et ressources naturelles - flux solaire - photosynthèse - homéostasie - processus cycliques 	<ul style="list-style-type: none"> - population - technologies - ressources (minérales et énergétiques) - processus linéaires
PROCESSUS EXTERNES DE CHANGEMENT	<ul style="list-style-type: none"> - perturbations des cycles biogéochimiques - modification climatique - déchets non biodégradables et pollutions - raréfaction des ressources de basse entropie - saturation des capacités d'absorption 	<ul style="list-style-type: none"> - croissance énergétique limitée - préférence pour la ressource la plus abondante de basse entropie (le flux solaire) - recyclage de la matière (organes exosomatiques consomment beaucoup de matière) - efficacité énergétique



VARIABLES CLES INTERVENANT DANS LES INTERACTIONS SYSTEME ENERGETIQUE-BIOSPHERE

L'énergie interne U est le contenu énergétique du système au sens physique du terme. L'énergie interne est une fonction d'état qui caractérise le niveau énergétique du système et dont la variation est mesurée par l'énergie-travail mise en jeu adiabatiquement (en l'absence d'échange de chaleur avec l'extérieur) entre le système et l'extérieur. (1)

L'analyse exergetique ou exergetique permet de mesurer la capacité d'effectuer un travail d'un système thermodynamique en quantifiant les pertes entropiques.

L'exergie représente l'énergie disponible, utilisable, l'énergie qui a de la valeur du point de vue du second principe de la thermodynamique. L'exergie est donc l'énergie maximale qui peut être extraite sous forme de travail physique. C'est aussi la quantité reliée négativement à l'entropie et mesurée dans les mêmes unités (J, kwh...).

Au sein d'un système ouvert, le flux d'exergie détruite est lié directement à une création d'entropie, caractéristique d'irréversibilités. (2). S.G.M. SCHILIZZI considère que l'analyse en terme d'exergie prend en compte le rôle productif de la technologie dans l'économie ainsi que sa relation avec l'environnement à travers la dissipation de l'exergie. (3) La technologie constitue une interface entre la sphère économique et l'ensemble des écosystèmes.

Pour les processus de production, la variation de l'exergie peut être calculée à partir de la relation :

$$dEX = - TdS \quad (2)$$

On peut en effet simplifier l'expression (1) en considérant dU et dV comme des variations négligeables.

Pour les combustibles et autres sources de chaleur, l'exergie peut être calculée à partir de : $dS = dQ/T$. Lorsqu'un système échange de façon irréversible une quantité de chaleur infinitésimale dQ à la température T , la variation d'entropie est égale à ce rapport. En négligeant les variations de volume ($dV = 0$) et en posant $dU = dQ$,

(1) L. BOREL, *Thermodynamique et énergétique*, vol.1, 1991, p.12.

$\Delta U = A^+$, A^+ est l'énergie-travail reçue de l'extérieur.

(2) P. LE GOFF, *Energétique industrielle*, tome 1, p.121.

L'exergie détruite est égale à l'entropie et est égale au travail dégradé.

(3) S.G.M. SCHILIZZI, "Physical economics, technology and agroecosystems", in G. PILLET, T. MUROTA, *Environmental economics, the analysis of a major interface*, 1987, p.110-113.

(1) s'écrit alors :

$$dEX = dQ - T_0 dS \quad (T=T_0)$$

$$\langle \text{----} \rangle \quad dEX = dQ - T_0 (dQ/T)$$

$$\langle \text{----} \rangle \quad dEX = dQ (1 - T_0/T)$$

L'exergie s'exprime donc par la relation :

$$EX = Q (1 - T_0/T) \quad (3)$$

Q est la quantité de chaleur reçue, T_0 température de la source froide et T température de la source chaude.

S.G.M. SCHILIZZI définit l'efficacité exergétique par le rapport suivant :

$$\partial = W/B = W / \mu Q$$

W, quantité de travail produite

B, exergie

μ , facteur de Carnot ($\mu < 1$) $\mu = 1 - T_0/T$

Q, quantité de chaleur reçue par le système

L'auteur considère que la technologie devient un système matériel qui a pour but d'utiliser une quantité et une qualité d'un flux d'énergie donné avec une certaine efficacité. La technologie -son efficacité exergique- est appréhendée en terme d'efficacité énergétique (ratio quantitatif) et à l'aide d'un facteur qualitatif qui décrit le travail potentiel d'une forme d'énergie donnée.

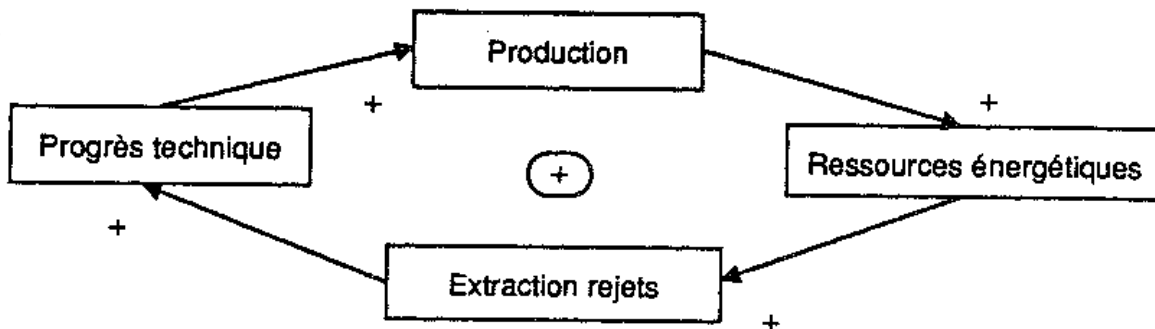
Au niveau du système énergétique, son efficacité est conditionnée par l'efficacité exergique des technologies de transformation. L'efficacité exergique mesure la capacité limitée du système conformément au second principe de la thermodynamique. Elle est liée aux rendements des technologies (facteur de Carnot) qui révèle l'inefficacité relative des technologies et l'impossibilité de transformer la totalité de l'énergie thermique -chaleur- en travail du fait de l'existence d'irréversibilités. C'est l'exergie détruite ou l'entropie créée par des processus irréversibles.

Le système énergétique a la propriété fondamentale de transformer les ressources en produits utiles et donc est capable de produire un "mouvement cohérent", un travail. En absorbant les ressources de basse entropie, il met ainsi en réserve l'énergie nécessaire à son fonctionnement. L'énergie dont il dispose pour produire ce travail est égale à la différence entre l'énergie qu'il rejette dans l'environnement (sous forme de chaleur : $T \cdot dS$, dissipation) et l'énergie qu'il reçoit (dQ).

Cependant, son fonctionnement se traduit par un déficit entropique et implique au niveau du système global un accroissement absolu de l'entropie.

"Il n'y a jamais, au niveau global, création de valeur énergétique, c'est à dire de surplus énergétique, mais toujours dissipation, en d'autres termes, déficit énergétique" (1).

Les conséquences qui en découlent sont l'apparition de processus perturbateurs de la biosphère dont la source se trouve au coeur du système énergétique, système dont l'efficacité exergetique est sous-optimale (2). Le rôle joué par le progrès technique - successions de technologies complexes - constitue un premier processus irréversible qui fonctionne comme un feed-back amplificateur. Au fil des siècles, il a permis une consommation d'énergie et de matière de plus en plus élevée et a impliqué des rejets croissants dans la biosphère. La relation est la suivante :



Cependant, la prise en compte des lois de la thermodynamique et des principes écologiques limitent le progrès technique.

L'épuisement des ressources et les pollutions dans l'environnement peuvent réduire les

(1) S. FAUCHEUX, *L'articulation des évaluations énergétique et monétaire en économie*, thèse Paris I, 1990, p.293.

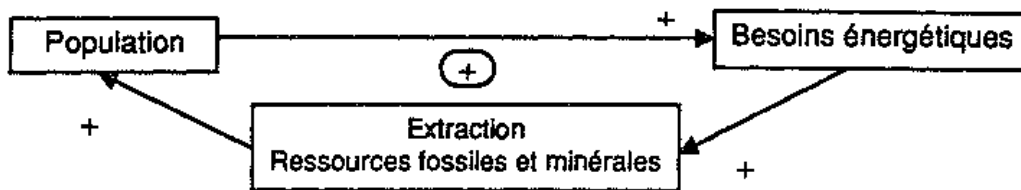
(2) Nous faisons référence ici au fait que l'optimalité correspond à un facteur de Carnot égal à 1 ou est très proche de ce facteur.

activités énergétiques et sont dans ce cas des processus externes au système énergétique caractérisés par des boucles de rétroaction négatives. Dans ce cas, c'est la loi de Liebig (facteur limitant) qui implique un mécanisme de régulation via des substitutions entre ressources énergétiques (exemple du bois/charbon en Grande-Bretagne au 19ème siècle).

La relation entre les technologies et leur évolution et les perturbations de l'environnement n'est pas simple : tout dépend des variations des variables, soit elles demeurent dans des limites où les mécanismes régulateurs jouent, soit elles dépassent les seuils d'adaptabilité du système. Dans ce cas, on est en présence d'un effet de seuil : il remet en cause la survie du système. Ses limites de tolérance sont dépassées.

L'effet d'irréversibilité est un effet beaucoup plus grave : il se produit lorsqu'un équilibre détruit ne peut se reconstituer car les conditions initiales de sa formation ont disparu (1). La rupture de l'équilibre est irrémédiable. Il est donc nécessaire de considérer l'articulation des activités énergétiques et leur dynamique avec la biosphère.

Une autre variable essentielle est constituée par l'évolution démographique : l'accroissement de la population a impliqué des consommations croissantes de matériaux et d'énergie. La population est donc un phénomène amplificateur non négligeable.

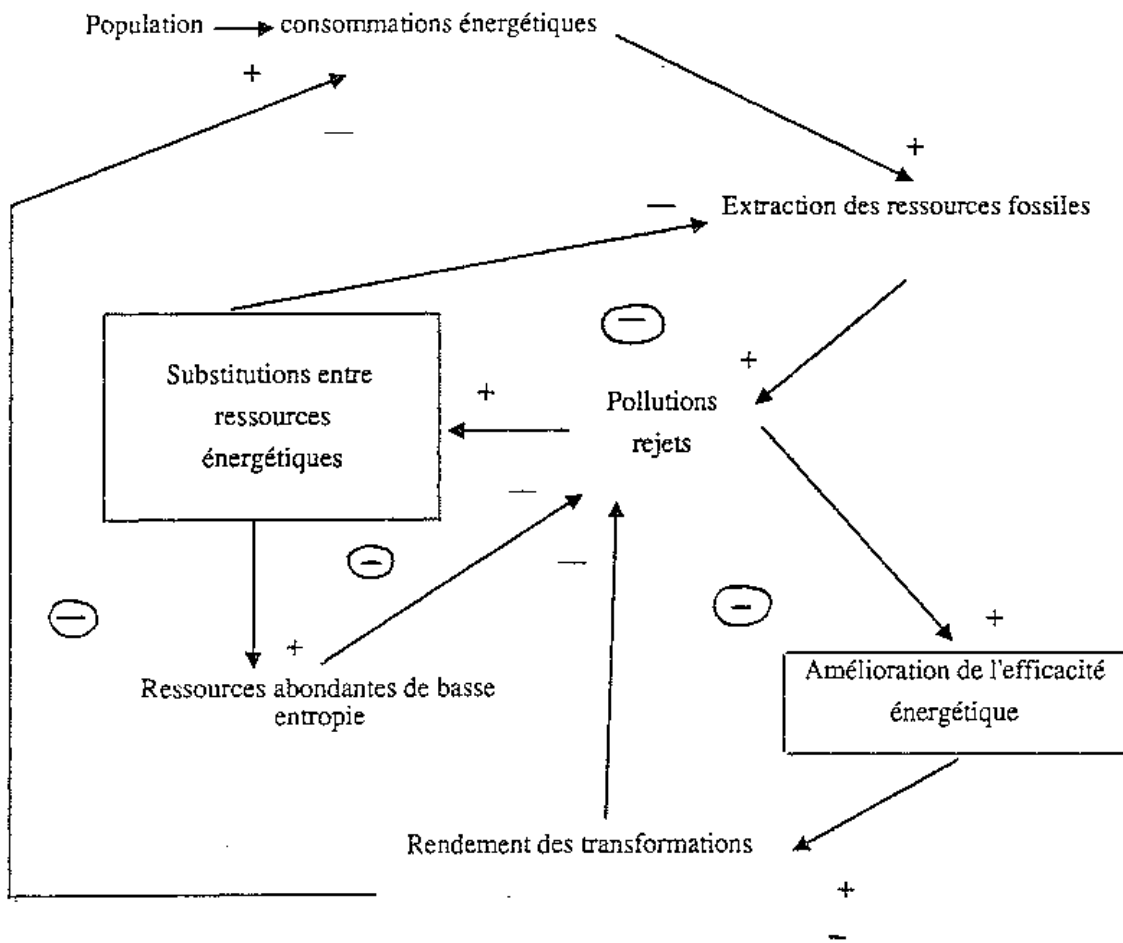


Si l'on souhaite observer à long terme une coévolution qui respecte les processus d'évolution internes de la biosphère et du système énergétique, il faut alors agir au niveau des processus externes et délimiter leur champ d'action, préciser des seuils à ne pas dépasser.

(1) R. PASSET, *L'économie et le vivant*, Payot, 1979, p.53-54.

Les interdépendances évolutives entre système énergétique et biosphère correspondant aux processus externes concernent un grand nombre de variables constituant un système complexe d'interrelations réciproques. Le diagramme causal s'établit de la manière suivante :

Au coeur des relations, la coévolution



La limitation de la croissance des consommations énergétiques est fonction de l'efficacité exergetique du système énergétique et du phénomène de substitutions interénergétiques, tous deux contraints par l'accumulation de pollutions dans la biosphère. L'évolution du système énergétique respecte celle de la biosphère dans la mesure où la frontière de celle-ci constituée par sa capacité maximum ou capacité de charge délimite les modalités de fonctionnement du système énergétique. C'est l'expression de la notion de "gestion normative sous contrainte" de R. PASSET. Il ne peut plus s'affranchir de sa dépendance à l'égard de la loi d'entropie (la croissance énergétique et son efficacité sont donc finies et bornées) comme à l'égard des principes écologiques (le niveau de disponibilité des ressources et la richesse des dotations minérales -basse entropie- constituent les limites essentielles du système énergétique).

Des boucles de rétroaction négatives interviennent et corrigent les déséquilibres. Les processus externes de changement jouent un grand rôle : à tout moment, ils peuvent remettre en cause les processus internes d'évolution et condamner définitivement le système. Pour notre propos, il convient de prendre en compte les implications de l'évolution du système énergétique et ses menaces sur la biosphère, sans quoi l'avenir de l'humanité risque d'être compromis.

Intégrer cette dimension pour les décennies à venir, c'est se donner les moyens de maîtriser l'évolution entropique de la biosphère et assurer une véritable coévolution garante du respect de l'ordre naturel.

Conclusion du chapitre

L'évolution passée du système énergétique s'explique par l'absence de considération à l'égard des principes thermodynamique et écologiques : système énergétique et biosphère semblaient évoluer dès lors chacun de leur côté, d'où des conflits manifestes. Loin d'être en opposition, leurs évolutions apparaissent interdépendantes et leurs modes de régulation très proches.

Une réconciliation est possible si le système énergétique futur est repensé afin de tenir compte de la globalité qui le porte et des interdépendances évolutives. C'est à ce prix que la maîtrise de l'évolution entropique est possible.

DEUXIEME SOUS-PARTIE :

VERS UN NOUVEAU SYSTEME ENERGETIQUE : MODALITES
D'UNES TRANSITION ET MAITRISE DE L'EVOLUTION ENTROPI-
QUE

"A thermodynamic analysis of the long-term prospect of economics clearly shows the present instability and points the way that societies will have to follow in the transition to renewable energy sources"

A.F. UMANA, Energy, economics and the environment.

CHAPITRE 7 : BESOINS ENERGETIQUES ET CHOIX TECHNOLOGIQUES : VERS UN SYSTEME ENERGETIQUE "SOUTENABLE"

Introduction

Le système énergétique actuel ne peut poursuivre son évolution sans compromettre de manière irréversible la pérennité des ressources énergétiques dans un contexte d'imbrication croissante des sociétés humaines. Une révolution majeure doit donc s'opérer dans la maîtrise de l'énergie afin de respecter la disponibilité non illimitée des dotations dans l'espace -capacité de charge de la biosphère- et dans le temps -équité intergénérationnelle, principe de conservation-.

Au coeur d'un nouveau système énergétique figure ainsi un nouveau type de développement qualifié de "développement soutenable". Nous parlerons de système énergétique soutenable pour préciser qu'il s'agit là d'un système énergétique garant d'une véritable coévolution dans un contexte de changement global.

Sa mise en oeuvre constitue une étape nécessaire dans la maîtrise de l'entropie de l'environnement, et par conséquent, son efficacité globale doit être améliorée. Il apparaît alors essentiel d'explorer le gisement potentiel de maîtrise énergétique (GPME) à travers deux composantes : les innovations d'économie et les innovations de substitution. Le potentiel technologique est l'élément clé du système énergétique soutenable : une utilisation optimale de ce potentiel peut conduire à une plus grande capacité d'adaptation et une plus grande résilience, et donc finalement à une flexibilité accrue du système énergétique.

§ 1 - L'interdépendance des systèmes économiques et écologiques au niveau global

Le point de départ conceptuel trouve ses origines dans les travaux de la commission des Nations-Unis sur l'environnement et le développement publiés en 1987 sous le titre "Our Common Future" (1). Ce rapport traduit les inquiétudes de la Commission face à de graves problèmes tels que l'accroissement de la population et l'insuffisance de la production céréalière, la dégradation locale mais aussi globale de l'environnement avec le recours aux combustibles fossiles, la disparition d'espèces végétales et animales, l'accumulation de déchets toxiques. Il met en exergue les effets du développement sur la biosphère, effets qui constituent des risques majeurs menaçant l'humanité toute entière.

La commission a proposé ainsi un nouveau type de développement qui implique la transformation progressive de l'économie et de la société avec la prise en compte de la biosphère. Elle propose une nouvelle approche de l'économie et de l'environnement. C'est le développement soutenable, traduction de l'expression anglaise "sustainable development".

"Le développement soutenable est un développement qui répond aux besoins du présent sans compromettre la capacité des générations futures de répondre aux leurs" (2).

Il traduit une prise de conscience des limites de la croissance sous sa forme actuelle et des risques au niveau planétaire. (3) Il existe plusieurs définitions du concept et plusieurs interprétations : un développement soutenable, supportable, durable, viable, vivable. Un développement soutenable doit être compris comme un développement à la fois durable - durée écologique et s'oppose à la notion de rendement-, viable -à long terme, échelle de changement global- et supportable -base de la coévolution, principe essentiel pour assurer la survie de la planète.

Le "développement soutenable" suppose ainsi un comportement différent de l'individu, de la société à l'égard de la nature et de ses richesses. Le rythme d'épuisement des ressources non renouvelables doit compromettre le moins possible l'avenir. Le développement

(1) Commission mondiale pour l'environnement et le développement, *Notre avenir à tous*, Ed. du fleuve, Montréal 1988. Il s'agit de la traduction de l'ouvrage "Our common future", World commission on environment and development, 1987, Oxford University Press.

D'autres rapports "précurseurs" s'intéressant aux relations entre sociétés humaines, développement économique et environnement ont été élaborés entre 1960 et 1987. Se reporter à l'article de M. BEAUD, "Risques planétaires, environnement et développement", *Economie et Humanisme*, juillet-août 1989, n°308, p.6-15.

(2) opus cité, p.51.

(3) "Le développement soutenable, c'est autre chose qu'une simple croissance. Il faut en effet modifier le contenu même de cette croissance, faire en sorte qu'elle engloutisse moins de matières premières et d'énergie et que ses fruits soient répartis plus équitablement". p.61.

des sources d'énergie renouvelables est donc un moyen pour satisfaire la croissance des besoins énergétiques. Ce potentiel pourrait, selon la commission, constituer le noyau de la structure énergétique mondiale du 21ème siècle.

Par ailleurs, le "développement soutenable" n'est possible que dans la mesure où la démographie et le système économique évoluent en harmonie avec le potentiel productif de l'écosystème ; ainsi, la maîtrise de la démographie apparaît-elle comme un objectif essentiel.

"Le développement durable est plus facile lorsque la population se stabilise à un niveau compatible avec les capacités de l'écosystème" (1).

Finalement, la mise en oeuvre du "développement soutenable" passe par un certain nombre d'impératifs qui doivent assurer le maintien des systèmes économiques des différents pays sur le long terme. Nous citerons : la modification de la qualité de la croissance (répartition des revenus, consommation d'énergie), la préservation et mise en valeur de la base de ressources, l'intégration des considérations relatives à l'économie et à l'environnement dans la prise de décisions, la satisfaction des besoins essentiels concernant l'alimentation, l'énergie.

M. BEAUD considère que ce rapport est le premier à poser le problème de l'interdépendance entre dynamique du développement, atteintes à l'environnement et montée des risques planétaires (2).

Le "développement soutenable" propose ainsi une voie nouvelle en révélant les interdépendances entre les systèmes économiques et sociaux et la biosphère.

"Nous nous sommes habitués peu à peu à la progression brutale de l'interdépendance économique entre nations. Nous devons maintenant faire de même avec l'interdépendance écologique. L'écologie et l'économie sont en effet étroitement liées - de plus en plus, d'ailleurs - à l'échelle locale, régionale, nationale et mondiale : c'est un écheveau inextricable de causes et d'effets" (3).

Le concept de "développement soutenable" exprime ainsi la coévolution : l'évolution des systèmes économiques et l'évolution de la biosphère sont interdépendantes.

(1) opus cité, p.66

(2) M. BEAUD, opus cité, p.14.

(3) Commission mondiale pour l'environnement et le développement, opus cité, p.6

Il apparaît alors nécessaire de gérer les interdépendances évolutives de manière à satisfaire les besoins des générations présentes sans compromettre la capacité de développement des générations futures. C'est là, la portée essentielle et originale du rapport BRUNDTLAND.

Les moyens proposés pour mettre en oeuvre le "développement soutenable" sont des moyens qui imposent le respect des principes écologiques et thermodynamiques. Le souci de gérer les dotations terrestres avec équité en témoigne : la préservation, l'amélioration de l'efficacité énergétique, le traitement des déchets, le respect de la capacité de renouvellement des milieux constituent les voies nécessaires d'une meilleure gestion des ressources naturelles.

Les auteurs du rapport précisent que ce développement s'accompagne de deux limites : la disponibilité des ressources énergétiques et la capacité de la biosphère à supporter les sous-produits dégagés par l'utilisation de l'énergie (1). La première limite traduit le principe écologique de saturation : la disponibilité d'une ressource n'est jamais illimitée car il existe des facteurs de saturation. De plus, elle est dépendante de l'efficacité des technologies à moment donné. Le second principe de la thermodynamique intervient ici.

La seconde limite traduit les perturbations imposées par le système énergétique à la biosphère. Elle exprime le principe relatif à la "carrying capacity" avec à l'accumulation des rejets dans l'environnement de la planète. Les émissions générées globalement - ou pollutions globales - déstabilisent les mécanismes de régulation de la biosphère.

Pour D.W. PEARCE et R.K. TURNER, la voie ouverte par le concept de développement soutenable peut être à l'origine d'une nouvelle relation entre développement et environnement à condition d'établir des principes garantissant la compatibilité entre système économiques et écologiques. (2) Le paradigme de la soutenabilité s'inscrit dès lors dans une perspective de coévolution éclairant sur les liens étroits existants entre systèmes écologiques et économiques.

(1) opus cité, p.68.

(2) D.W. PEARCE, R.K. TURNER, *Economics of natural resources and the environment*, 1990, p.43-58.

Cette perspective est également partagée par les auteurs suivants :

- H.E. DALY, "Towards some operational principles of sustainable development", *Ecological economics*, 2, 1990, p.1-6.

- P.A. VICTOR, "Indicators of sustainable development : some lessons from economics", *Ecological economics*, 4, 1991, p.191-213.

Une économie soutenable doit alors intégrer dans la gestion des ressources environnementales deux fonctions : offreur de ressources et assimilateur de déchets. De plus, cette gestion doit s'appuyer sur deux principes : d'une part, le taux d'utilisation doit demeurer inférieur au taux de régénération, et d'autre part, le flux de déchets doit rester en deçà de la capacité d'assimilation du milieu naturel. Par ailleurs, les ressources fossiles s'épuisant, la réduction du stock doit être compensée par un recours aux ressources renouvelables. (substitutions). Ils considèrent aussi qu'une réduction du stock de ressources peut assurer un même niveau de vie dans la mesure où l'efficacité dans l'utilisation des ressources est améliorée.

Finalement, une condition essentielle pour assurer la soutenabilité des économies réside dans le maintien du stock de capital naturel dans le temps, condition qui assure alors un accès égal aux ressources pour les générations successives (équité intergénérationnelle), une capacité d'adaptation du fait d'une élasticité accrue des écosystèmes, et le respect des droits des animaux (respect de l'habitat, de leur territoire de chasse...). (1) Pour les auteurs, le développement soutenable se définit ainsi :

"It involves maximising the net benefits of economic development, subject to maintaining the services and quality of natural resources over time" .(2)

Au sein du "développement soutenable", le système énergétique occupe une place prépondérante : sans les ressources énergétiques, le développement n'est pas possible et avec elles, il est contraint par la "carrying capacity" de la biosphère. Le système énergétique actuel ne peut donc se prolonger davantage au risque de compromettre le "développement soutenable". A long terme, une transition vers un nouveau système que nous qualifions de "soutenable" est une nécessité absolue.

Un système énergétique soutenable se définit ainsi :

- il permet la satisfaction des besoins présents sans compromettre la pérennité des ressources - souci d'équité intergénérationnelle
- il met en valeur la base de ressources renouvelable - substitutions inter-énergétiques
- il s'appuie sur des technologies à haute efficacité énergétique - base de choix technologiques
- il recycle systématiquement la matière rejetée afin de la réutiliser - forte diminution des rejets solides.

Par définition, le système énergétique soutenable est régi par les principes écologiques et thermodynamiques. Ces principes le caractérisent et l'orientent dans le temps en respectant les équilibres de la biosphère. La mise en oeuvre de ce système peut contribuer à une maîtrise efficace de l'entropie de la biosphère. C'est l'objet de l'exposé qui va suivre.

§ 2 - Croissance du système énergétique et principe écologique de stabilité : l'union difficile

Le système énergétique actuel se caractérise par la prédominance des ressources fossiles, ressources largement exploitées afin de satisfaire le développement économique des sociétés humaines.

Au fil des siècles, c'est donc le principe de croissance qui a prévalu avec l'augmentation continue de la contribution énergétique dans les activités humaines. Alors que les besoins énergétiques augmentaient rapidement, les ressources fossiles étaient les seules destinées à les satisfaire. L'évolution du système énergétique s'est donc accompagnée d'une diminution de sa variété, de sa diversité.

Consommation mondiale d'énergie

1988	en 10 ¹⁵ kilojoules	en %
Pétrole	121	38
Charbon	96	30
Gaz naturel	65	20
Hydroélectricité	22	7
Nucléaire	17	5

Source : Pour la science, numéro spécial "l'énergie", Novembre 1990

Le principe de croissance est un principe purement quantitatif qui a conduit à utiliser une plus grande quantité de ressources sans se préoccuper de leur qualité. Le système énergétique, en privilégiant les ressources fossiles, détruit progressivement les ressources de basse entropie non renouvelables et accroît l'entropie de la biosphère. La diminution de la diversité du système a pour corollaire l'affaiblissement de sa capacité de survie d'adaptation et une instabilité croissante.

En effet, compte tenu des risques planétaires encourus, le système énergétique tel que nous le connaissons n'est pas viable à long terme. Sa capacité d'adaptation compte tenu des perturbations imposées à la biosphère (accroissement de CO₂ notamment) est très limitée puisque près de 90 % des besoins sont satisfaits par les ressources fossiles (génératrices de CO₂). Par ailleurs, il ne peut réagir de manière satisfaisante face au dépassement de la capacité d'absorption des rejets - déchets de la biosphère.

D'un côté, l'exploitation des ressources énergétiques et leur utilisation se traduit par une production de rejets et déchets nocifs, non dégradables, qui sont évacués de la sphère économique. D'un autre côté, la biosphère au sein de laquelle des ressources ont été puisées, doit s'accommoder de la production croissante de rejets et déchets libérés par la sphère économique.

Finalement, la dispersion et le stockage de ces effluents nocifs traduit l'accélération de la dégradation de l'environnement et la diminution de la capacité d'absorption des milieux naturels. L'impossibilité pour le système énergétique de proposer une solution face aux rejets qu'il libère "naturellement" exprime son instabilité, instabilité qualifiée de "croissante" compte tenu de l'accumulation des déchets et rejets atmosphériques au fil des décennies. Le système énergétique est en rupture totale avec la biosphère : la prise en compte du seul principe de croissance, croissance quantitative, a de facto ignoré le principe écologique de stabilité, principe fondamental qui oriente le fonctionnement des écosystèmes. Le principe de stabilité peut se définir par l'aptitude d'un système à réagir à une perturbation extérieure en mettant en oeuvre des mécanismes de régulations (rétroactions négatives) qui lui permettent de maintenir sa structure.

E.P ODUM écrit : "According to this concept, any natural enclosed system with energy flowing through it (...) tends to change until a stable adjustment, with self-regulating mechanisms, is developed. Self-regulating mechanisms are mechanisms which bring about a return to constancy if a system is caused to change from the stable state by a momentary outside influence". (1)

Comme nous l'avons vu avec les apports de K.E WATT (2), il existe une relation essentielle entre stabilité et diversité : une grande diversité d'un écosystème implique une grande stabilité, autrement dit implique une grande capacité homéostatique. La variété du système est une condition essentielle pour sa stabilité et donc pour assurer l'homéostasie.

(1) E.P.ODUM, *Fundamentals of ecology*, second edition, Saunders, 1971, p.45-46.

(2) se reporter au chapitre 5 "Fondements et principes de la thermodynamique", section 1, paragraphe 2.

La stabilité ou homéostasie par extension permet de maintenir la structure des écosystèmes mais n'est possible que s'il existe une grande diversité, variété d'espèces. La stabilité de l'ensemble est assurée par la multiplicité des espèces et la diversité de leurs rapports (1).

A côté de la propriété d'adaptabilité contenue dans le principe de stabilité, figure une autre propriété essentielle : elle s'exprime avec le concept d'élasticité. Ce concept permet d'élargir la notion de stabilité. C'est C.S HOLLING qui a proposé il y a quelques années une approche dynamique de non-équilibre des écosystèmes qui met l'accent sur l'importance de la notion d'élasticité. (2) Pour HOLLING, la stabilité traduit la capacité d'un système de revenir à un point d'équilibre après une période de perturbations ; il s'agit d'une stabilité locale d'un état particulier.

D'un autre côté, l'élasticité est l'aptitude d'un système à maintenir sa structure et son comportement en présence d'une perturbation.

"Stability (...) emphasizes equilibrium, low variability and resistance to and absorption of change. In sharp contrast, resilience emphasizes the boundary of a stability domain and events far from equilibrium, high variability, and adaptation to change". (3) L'élasticité détermine la persistance des relations caractéristiques d'un système. Elle est une propriété des systèmes qui possèdent plusieurs domaines d'attraction stables. La caractéristique essentielle des écosystèmes naturels est, selon HOLLING, d'être "multistables" et donc d'être dotés de 2 ou plusieurs zones d'attraction où les variables du système s'établissent.

HOLLING a montré qu'un système conserve son élasticité dès lors qu'il reste dans une zone d'attraction ; région où les variables du système tendent à rester. A l'intérieur d'une zone, l'état du système peut fluctuer et donc être instable. L'élasticité mesure ainsi la capacité de résistance du système aux variations des variables d'état, des variables d'action et des paramètres. Le système peut également, sous l'effet de combinaison de processus internes et de perturbations externes, quitter une zone d'attraction et s'établir dans d'autres zones.

(1) R. PASSET, *L'Economie et le vivant*, Payot, 1979, p.85.

(2) C.S. HOLLING, "The resilience of terrestrial ecosystems : local surprise and global change", in W.C. CLARK, R.E. MUNN, *Sustainable development of the biosphere*, IIASA, 1986, p.292-320.

(3) C.S. HOLLING, opus cité, p.297.

Il peut donc manifester de brusques changements de comportements ; un comportement chaotique n'est pas exclu (1).

Une conclusion générale de son analyse est la suivante : la discontinuité du changement est une propriété inhérente à de nombreux écosystèmes.

La dynamique d'évolution des écosystèmes fait apparaître l'alternance de périodes d'accroissement de l'organisation et de périodes de destructuration. Les rythmes de changement naturels, changements déterminés par le développement de processus internes et externes, déterminent le degré de productivité et l'élasticité des écosystèmes.

HOLLING considère 4 phases de valorisation de l'écosystème. (voir schéma page suivante).

A une première phase d'exploitation succède lentement une seconde phase de conservation. A la phase de conservation succède rapidement une troisième phase de destruction créatrice. Enfin, à la destruction succède rapidement la quatrième phase de renouvellement. Ce processus évolutif cyclique recommence sans fin.

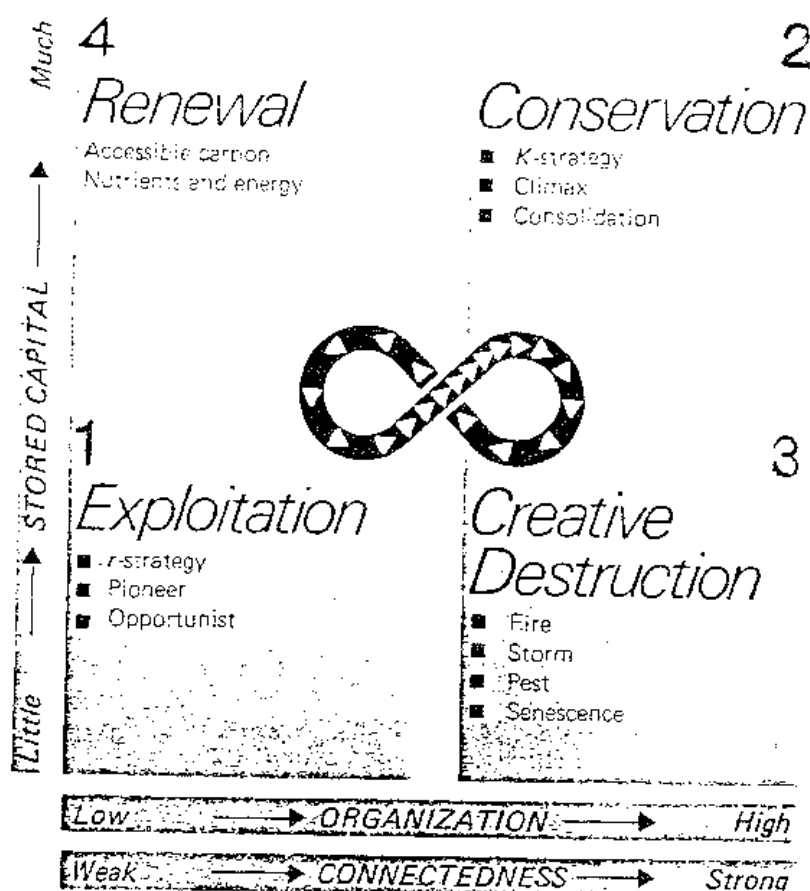
Pendant la séquence exploitation-conservation, la stabilité et l'organisation, la connexité augmentent et le capital de matières nutritives et d'énergie s'accumule lentement. Avec le passage du temps, les liens de plus en plus étroits qui existent entre les espèces concurrentes et prédatrices rendent l'écosystème plus dépendant des conditions existantes de sorte qu'il devient plus fragile. Le système devient finalement surconnecté (2) : cette surconnexion déclenche un brusque changement . C'est par exemple le cas d'une forêt adulte dévastée par le feu ou attaquée par des insectes, des maladies. Le capital stocké est libéré et le système se trouve déconnecté pour permettre un renouvellement du même état stable ou le passage à un nouvel état.

L'évolution du système vers un nouvel état ou le renouvellement d'un état antérieur va dépendre de la quantité de capital biophysique accumulé. Si les réserves accumulées ne sont pas importantes, le système va alors se dégrader. Au contraire, si elles sont suffisantes, le capital accumulé sera utilisé par le système afin qu'il libère ses éléments nutritifs et permette l'émergence d'une nouvelle organisation.

(1) opus cité, p.305.

(2) Il existe donc un "effet de seuil" qui entraîne une réponse brutale et irréversible de l'environnement.

Les quatre fonctions de l'écosystème et leurs relations d'interdépendance



Source : C.S HOLLING, op.cité, p. 307

Ainsi, le feu qui détruit une forêt libère les éléments nutritifs accumulés dans les arbres, mais ceux-ci pourront fertiliser les rivières et océans en s'infiltrant dans le sol et les eaux souterraines. Mais la plus grande partie de ces éléments restera dans le sol jusqu'à la ré-organisation du système. De tels événements recèlent donc les plus grande possibilités d'évolution pour un écosystème.

"Un évènement imprévu et soudain, mettra fin à l'équilibre qui régnait et permettra aux espèces rares d'exploiter cette nouvelle ressource et de proliférer". (1)

Les écosystèmes naturels qui contiennent une variété importantes d'espèces sont donc dotés d'une grande élasticité. D'où la nécessité pour l'homme de préserver le capital bio-physique accumulé.

(1) C.S. HOLLING, S. BOCKING, "L'imprévu, une occasion à saisir au bond", in La terre en péril, C. MUNGALL, D.J. MCLAREN, 1990, p.316.

C'est un moyen pour préserver la capacité d'adaptation qui exprime la possibilité pour la nature de se régénérer (1).

A la lumière de ces enseignements, nous pouvons remarquer que le système énergétique n'a, à aucun moment de son évolution, développé de mécanismes de régulations destinés à lui assurer une stabilité, une élasticité. La succession des cycles énergétiques exprime la diminution constante de sa variété avec la prédominance d'une seule source d'énergie associée à chacun des cycles et par conséquent, traduit l'accroissement de la fragilité du système énergétique ; c'est à dire une diminution de son élasticité.

Ainsi, il ne s'est pas donné les moyens d'assurer ni l'élimination et le traitement des déchets générés, ni la maîtrise technologique de la base renouvelable des ressources énergétiques : son "capital biophysique" s'est progressivement amenuisé si bien qu'il se trouve aujourd'hui dans une impasse.

Dans une étude originale, N. KAWAMIYA a analysé les interrelations entre la technologie, les ressources énergétiques et minérales, l'environnement et les systèmes humains en développant une approche entropique (2). En mesurant la qualité des ressources primaires à partir d'un indicateur particulier appelé "the entropy of mixing" -"entropie de mélange"-, il démontre comment le développement industriel par une succession de cycles de Kondratief s'est accompagné d'un accroissement de l'entropie. Son idée est la suivante : les sources d'énergie qui ont successivement accompagnés les cycles se caractérisent par une "entropie de mélange" de plus en plus élevée, autrement dit s'accompagnent d'une diffusion spatiale des polluants de plus en plus importante qui perturbe les écosystèmes. Le développement des technologies tout au long des cycles a ainsi permis des substitutions inter-énergétiques génératrices d'entropie croissante.

L'accroissement de l'entropie de mélange, à laquelle participent des quantités d'énergie et de matières minérales de plus en plus colossales amène l'auteur à proposer une voie nou-

(1) C.S. HOLLING, S. BOCKING, "L'imprévu, une occasion à saisir au bond", in *La terre en péril*, C. MUNGALL et D.J. MCLAREN, presses de l'université d'Ottawa, 1990, p313-330.

(2) N. KAWAMIYA, "Thermophysical analysis of resource substitution, technological developments and the environmental problems in their interrelation", in G. PILLET, T. MUROTA, *Environmental economics*, R. LEIMGRUBER, 1987, p.37-51.

velie pour assurer un "développement soutenable".

Comme la base de ressources non renouvelable est indispensable pour le développement industriel mais que son utilisation massive implique non seulement son épuisement mais aussi un accroissement de la teneur en CO₂ atmosphérique, les technologies autorisant une diminution globale des consommations de matière et d'énergie devraient être encouragées. Et de conclure ainsi :

"To accept such a restriction positively is the price we have to pay for the long-term coevolution between humanity and the biosphere".

Pour parvenir à un système énergétique soutenable, nous pensons que le système énergétique actuel doit être modifié en profondeur dans sa structure. Il doit acquérir une plus grande stabilité en se diversifiant par le développement de sa base renouvelable et en multipliant ses possibilités de réponse - ou aptitude à l'adaptation - en s'accordant une plus grande élasticité. Cette "flexibilité d'adaptation" signifie qu'il ne dispose pas d'une solution unique mais d'un ensemble de solutions, de sorte que le développement d'une énergie particulière ne peut être à lui seul satisfaisant. Il existe donc au moins une combinaison d'énergies, combinaison qui sera toujours plus efficace que le choix mono-énergétique. Il n'y aura donc jamais substitution absolue. (1) L'élasticité du système énergétique est d'une importance majeure : elle est garante d'une flexibilité dans les choix énergétiques et donc technologiques pour le long terme. Ainsi, le système énergétique ne doit pas s'orienter vers un sentier mono-énergétique au risque d'aboutir à une irréversibilité technologique. Des scénarios proposant la solution nucléaire comme unique solution alternative face à l'effet de serre constituent des voies dangereuses : le système énergétique voit sa capacité d'adaptation diminuer en se privant des moyens d'explorer d'autres sentiers énergétiques possibles dans l'avenir (2).

(1) Cette idée est en totale opposition avec la thèse défendue par NORDHAUS.

(2) C'est le sens de la critique à l'égard du scénario "tout nucléaire" de MARCHETTI proposée par J-C HOURCADE et al., in "Modifications climatiques, réorientation des politiques énergétiques : comment gérer l'incertitude ?", *Conférence mondiale de l'énergie*, Montréal 1989, p.16.

On peut se reporter aux articles suivants :

- BENNETT L.L., MARQUES DE SOUZA J.A., "Nuclear power for environmental protection", *Conférence mondiale de l'énergie*, 1989, Montréal.

- HAFELE W., "La solution nucléaire", *Pour la Science*, novembre 1990, n°157.

- MARCHETTI C., "How to solve the CO₂ problem without tears", in OCDE/AIE, *Energy technologies for reducing emissions of greenhouse gases*, 1989, p.161-191.

Préserver la diversité du "capital biophysique" du système énergétique constitue donc un premier pas vers un système énergétique soutenable. Ainsi, au lieu de privilégier la croissance quantitative, c'est une forme de croissance qualitative en harmonie avec l'environnement qui satisfera les besoins énergétiques. Par ailleurs, il apparaît essentiel d'améliorer le fonctionnement du système en élevant le rendement énergétique des technologies. Par ce biais, les pertes de matière et d'énergie pourront être réduites et le gaspillage de la base non renouvelable pourra être évité.

§ 3 - Éléments pour une efficacité énergétique

Les rejets libérés par le système énergétique traduisent du seul point de vue thermodynamique, l'importance des pertes d'énergie et de matière, caractéristiques d'une sous-optimalité de nature physique. Cela exprime un gaspillage important de matière et d'énergie qui pourrait apparaître inéluctable à toute activité de transformation et d'utilisation des ressources. Or, si il existe une limite absolue à toute conversion de chaleur en travail mécanique, limite imposée par le second principe de la thermodynamique, il demeure possible de s'en approcher compte tenu des effets du progrès technique.

P. CHARTIER considère que les progrès réalisés dans le domaine des matériaux et dans le domaine des technologies de l'information renouvelle les gisements d'amélioration de l'efficacité énergétique. L'efficacité énergétique se traduit par la satisfaction des besoins au moindre coût énergétique et écologique (1).

Dans une étude récente, B. DESSUS démontre comment les avancées technologiques dans de nombreux domaines ont contribué à l'amélioration de l'efficacité énergétique (2). L'exemple de l'automobile est de ce point de vue révélateur. Grâce à des améliorations relatives à la conception à l'ensemble mécanique et grâce à l'introduction de matériaux nouveaux, d'importantes économies de matières premières et d'énergie sont réalisées. On observe entre 1950 et 1995 une forte baisse du contenu énergétique de la fabrication d'une voiture ainsi que des consommations spécifiques (voir tableaux).

Évolution du contenu énergétique de fabrication des voitures (thermies)

Type	Total	Acier	Verre	Non ferreux	Plastiques + caoutchouc	Divers
Peugeot 203	7970	5300	350	150	1200	970
Peugeot 204	7940	3800	280	2000	1000	860
Peugeot 205	7060	2700	180	1500	1800	880
Peugeot Eco. 2000 (prospective)	4900	1700	130	1100	1300	670

Estimation de l'évolution des consommations spécifiques des principaux matériaux automobiles de 1950 à 2000

	1950	1965	1983	1995
Acier	8 000	7 400	5 800	5 000
Verre	7 500	6 600	5 600	5 200
	3 500	3 300	3 000	2 800
Aluminium	49 000	45 000	36 000	33 000
Plastiques	26 000	24 000	19 000	17 000

(1) P. CHARTIER, "Recherche technologique, énergie et environnement", *Le monde*, 17.10.90. P. CHARTIER est directeur scientifique de l'agence française pour la maîtrise de l'énergie.

(2) B. DESSUS, *Incertitudes et promesses technologiques à long terme dans le domaine énergétique*, 1989, p.4-9. Voir également l'article : "Énergie-développement-environnement, un enjeu planétaire au 21ème siècle", *Revue de l'énergie*, nov. 89, p.978-982.

Au niveau de système énergétique, il est donc possible de prendre en compte le rôle du progrès technique et de mesurer son efficacité dans le temps au regard des enseignements des principes thermodynamiques. Cela suppose de mesurer l'efficacité des technologies utilisées afin de transformer l'énergie primaire en une forme plus élaborée - l'énergie secondaire - (1) par la mesure de la dissipation de l'énergie et de la matière. Toute amélioration des rendements énergétiques implique la baisse des rejets en économisant l'énergie et la matière, ce qui implique un ralentissement de l'augmentation de l'entropie de l'environnement naturel.

L'approche exergetique peut se révéler intéressante de ce point de vue. En prenant en compte les principes 1 et 2 de la thermodynamique, elle permet de caractériser quantitativement les pertes entropiques ou thermodynamiques et d'attribuer ainsi une signification quantitative à la dégradation de l'énergie (2). Selon L. BOREL, seule la comptabilité exergetique permet d'exprimer la qualité thermodynamique d'un système, autrement dit, de définir un rendement thermodynamique exprimant le degré de perfection correctement. (3)

Dans un environnement donné, une quantité de ressource énergétique représente une exergie maximale, c'est à dire un potentiel pour un travail utile. Une technologie de transformation des combustibles fossiles consiste à "extraire" l'énergie libre ou disponible qu'ils contiennent afin de la mettre à disposition des individus pour des usages énergétiques. Le rendement énergétique des processus de conversion de l'énergie va reposer dans ces conditions sur la notion d'énergie utile ou utilisée et sur la notion d'exergie. L'efficience exergetique de la technologie prend en compte les quantités des différentes énergies ainsi que leurs qualités.

J.B. LESOURD et Y. GOUSTY ont proposé une technique de comptabilité énergétique à partir de la notion d'exergie. (4)

(1) l'énergie secondaire est la forme sous laquelle l'énergie primaire est consommée après transformations (électricité par exemple).

(2) G. PILLET et al., "Exergy, emergy and entropy", in G. PILLET et T. MUROTA, *Environmental economics*, 1987, p.277-302.

(3) L. BOREL, "La comptabilité exergetique, fondement de l'économie énergétique", *SEBES*, octobre 1991, p.21.

(4) J-B LESOURD, Y. GOUSTY, "Bases économiques et thermodynamiques des techniques de comptabilité de l'énergie", *Revue d'économie industrielle*, n°15, 1981, p.44-59.

Cette procédure rend ainsi possible l'agrégation de différentes énergies, chacune d'elles étant mesurée par son exergie. Ils proposent de retenir un "rendement second principe" de la forme :

$$R = \frac{\text{énergie utile fournie par 1 système}}{\text{énergie maximale pouvant être extraite sous forme de travail physique de l'énergie reçue par ce système}}$$

Au dénominateur figure une énergie utile primaire, i.e disponible avant transformation par la technologie : il s'agit d'une "exergie".

Les auteurs proposent ainsi un agrégat des exergies pondérées par leurs rendements "second principe" ou agrégat des énergies utiles secondaires, effectivement disponibles après transformation et incorporées au produit.

Nous pouvons en considérant le système énergétique, système qui échange de l'énergie et de la matière avec la biosphère, caractériser les processus de conversion de l'énergie par une mesure exergétique. Nous allons être amenés à établir un bilan ou balance exergétique qui prendra en compte les entrées et les sorties d'énergie et de matière dans le système. Il faut noter qu'avec l'approche exergétique la matière apparaît en tant que telle et n'est pas convertie en énergie.

En thermodynamique, le bilan exergétique est relié à deux autres bilans : les bilans énergétique et entropique (1).

Le bilan énergétique, expression de la loi de conservation de la matière et de l'énergie, s'écrit :

$$dU = \sum_j E_j^+ \quad , \quad U \text{ est l'énergie interne et } E^+ \text{ est l'énergie qui entre dans le système (chaleur + masses de matière)}$$

Le bilan entropique, expression du second principe thermodynamique, s'écrit :

$$dS = dS_e + dS_i$$

S : entropie du système

S_e : entropie liée à des irréversibilités externes

(1) - P. LE GOFF, *Energétique industrielle*, tome 1, 1979, Ed. Techniques et documentation, p.99-133.

- G. PILLET et al., opus cité, p.283-285.

Pour un exposé détaillé, se référer à L. BOREL, *Thermodynamique et énergétique*, vol.1, p.384-388.

S_i : entropie liée à des irréversibilités internes

Ce bilan peut s'écrire sous la forme :

$$dS = \frac{dQ^\pm}{T} + \sum_j s_j dm_j^+ + dS_i$$

S : entropie du système

Q^+ : chaleur reçue par le système

T : température absolue (en degré Kelvin)

s_j : entropies massiques

dm_j^+ : masse de constituants j entrant dans le système

S_i : création d'entropie générée par des processus internes irréversibles

Le bilan exergetique s'écrit : $Ex^- = Ex^+ + w^+ + \sum_i Q_i^+ (1 - \frac{T_0}{T_i}) - L$

Ex^- : exergie de sortie (ou exergie fournie par le système)

Ex^+ : exergie d'entrée (ou exergie consommée par le système)

On a : $Ex^- \leq Ex^+$

w^+ : travail reçu par le système (énergie mécanique)

Q_i^+ : quantités de chaleur reçues par le système (énergies calorifiques)

L : exergie détruite

Ce bilan permet de définir les pertes exergetiques et par conséquent la quantité maximale de travail que peut produire le système.

"L" représente la diminution du travail disponible au sein du système résultant d'irréversibilités internes. Formellement, on a : $L = T_0 S^i \geq 0$

L'exergie détruite dans le système est directement liée à une création d'entropie ; elle est définie comme le produit de l'entropie S_i et de la température moyenne T_0 de l'atmosphère. "L" s'appelle aussi travail dégradé.

Le travail réel se définit par : $w^- = Ex^+ - Ex^- - L$

Le travail maximal peut s'exprimer par : $w^-_{max} = Ex^+ - Ex^-$. Cette expression s'écrit encore : $w^-_{max} - w^- = L \geq 0$

$$\text{d'où : } \bar{w} = \bar{w}_{\max} - L$$

Le travail réel fournit par le système apparaît ainsi comme la différence entre le travail maximal et les pertes exergétiques. Ce résultat révèle que, dans la réalité, les irréversibilités internes ont pour conséquence la diminution du travail effectif (\bar{w}) de la quantité L qui ne peut être que positive ou nulle ; le cas où L est nul correspond à l'hypothèse d'une réversibilité de tous les processus internes ($S_i = 0$). Le terme " L " constitue donc bien des pertes exergétiques.

On peut définir le rendement exergétique par le rapport suivant :

$$R = \frac{\bar{w}}{\bar{w}_{\max}} = \frac{Ex^+ - Ex^- - L}{Ex^+ - Ex^-}$$

$$R = 1 - \frac{L}{Ex^+ - Ex^-} = 1 - \frac{T_0 S_i}{\bar{w}_{\max}}$$

Comme, en vertu du second principe, $L \geq 0$,

$$\text{on a : } 0 \leq R \leq 1$$

$R = 0$, le système ne fournit aucune prestation exergétique

$R = 1$, le système est parfaitement réversible. ($L = 0$).

La quantité maximale de travail que le système peut fournir, son exergie, dépend de la création d'entropie au sein du système : son exergie sera maximale quand l'entropie créée - ou exergie détruite - sera minimale. Toute amélioration du rendement exergétique implique une diminution des pertes entropiques, une "maîtrise" de la dissipation, de la dégradation de l'énergie. Elle implique une diminution de l'exergie détruite.

L'exergie permet de définir l'énergie qui entre et sort du système de manière qualitative : elle représente la part de l'énergie qui peut être entièrement transformée en travail ; "énergie mécanisable". Une hiérarchie qualitative peut être établie sur la base de l'approche exergétique.

**Thermodynamic Quality of Sources
According to Market Considerations**

<i>Supply side</i>		<i>Demand Side</i>	
Wood	0,674	Electricity	1
Gasoline	0,705	Transportation	1
Coal	0,707	Cooking	
Electricity	1	frying	0,43
		boiling	0,27
		Hot Water 70°C	
		+ 7°C	0,18
		Domestic Heaters 20°C	
		+ 7°C	0,045

in G.PILLET et al., "exergy, energy and entropy", Environmental economics, 1987, p.287. (after Schilizzi).

Pour apprécier les estimations de ces qualités exergétiques, nous devons rappeler que, sur la base du second principe, deux formes d'énergie distinctes existent :

- la chaleur ou énergie thermique. C'est la forme "dégradée" de l'énergie.
- le travail physique ou énergie mécanique. C'est la forme "noble" de l'énergie.

Pour les énergies utilisées comme sources de chaleur -ensemble des combustibles fossiles-, le bilan exergétique s'écrit (1) : $Ex^- - Ex^+ = Q r$

où $r = 1 - \frac{T_0}{T}$, coefficient de Carnot

Q : quantité de chaleur reçue provenant du combustible. Cette quantité est échangée à la température T. T₀ est la température de la source froide. (température de l'atmosphère)

(1) P. LE GOFF, opus cité, p.123.

La limite maximale théorique de la transformation de l'énergie thermique en énergie mécanique est fournie par le coefficient de Carnot.

La valeur exergétique de la quantité Q est égale à : $Q(1 - T_0/T)$

La valeur de la chaleur est identique à sa "mécanisabilité".

Pour les ressources énergétiques utilisées comme énergie de nature non calorifique - énergie mécanique et énergie électrique -, P. LE GOFF considère que leur valeur exergétique est égale à 1. Les énergies "nobles" sont de l'exergie pure (1). C'est le cas de l'énergie mécanique - force motrice- et de l'énergie électrique. A la lecture des données chiffrées, il apparaît différentes qualités exergétiques des énergies.

L'intérêt d'une analyse exergétique est d'orienter les techniques de conversion vers une meilleure utilisation des inputs énergie et matière. Elle peut aussi aider à choisir entre deux systèmes techniques alternatifs (2). Au sein du système énergétique, l'amélioration des rendements des différents processus de transformation des ressources permettrait une utilisation plus rationnelle de l'énergie et de la matière. Les rendements observés demeurent très en deçà des rendements théoriques (de Carnot). Pour R. DUMONT, une machine thermique courante à un rendement théorique de l'ordre de 50 à 60 % ; mais compte tenu des frottements et des pertes de charge notamment, son rendement énergétique réel ne dépasse pas 35 % (3).

Le tableau suivant présente quelques rendements moyens à titre indicatif.

(1) P. LE GOFF, opus cité, p.76.

(2) S.G.M. SCHILIZZI, " Physical economics, technology and agroecosystems", in G. PILLET, T. MUROTA, *Environmental economics*, 1987, p.115-124.

(3) R. DUMONT, *Economies et conversion d'énergie*, Masson, 1980, p.47.

Rendement des appareils de transformation d'énergie

Forme d'énergie produite	Types d'appareil	Rendement %	Pertes %
Production de chaleur	Chaudière fioul	70-80	20-30
	Chaudière gaz naturel	75-85	15-25
	Chaudière charbon	60-70	30-40
	Chauffage solaire	50-70	50-30
	Chauffage électrique	100-95	0-5
Production d'électricité	Centrale hydro-électrique	85-90	
	Centrale au fioul	40	10-15
	Centrale au charbon	35	60
	Centrale électro-nucléaire PWR	30	65
	Centrale solaire	25	70
	Pile solaire	10	75
Production d'énergie de mouvement	Machine à vapeur	10-40	90-60
	Moteur Diesel	30	70
	Moteur à essence	25	75
	Moteur électrique	85	15
Production de lumière	Lampes à incandescence	5	95
	Lampes à fluorescence	20	80

Source : CHEVALIER et Al., Economie de l'énergie, DALLOZ, 1986, p.126

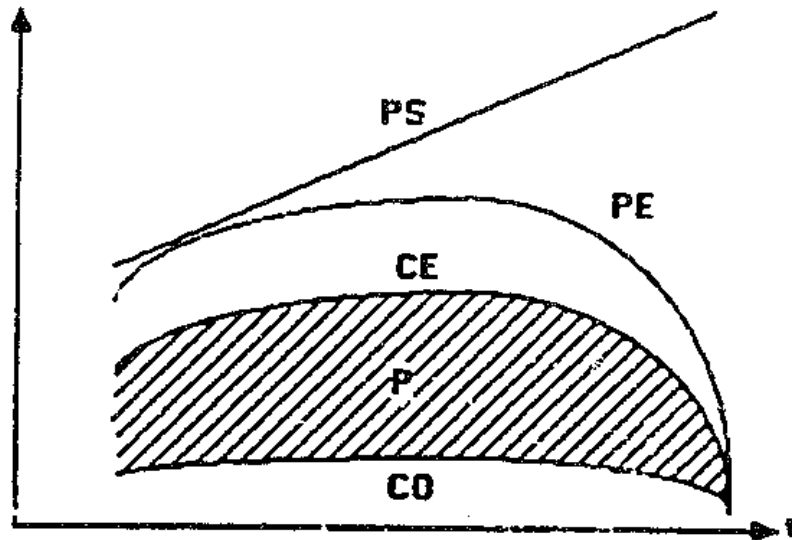
Afin d'apprécier les possibilités de diminuer les gaspillages révélés par l'importance des pertes physiques, S. FAUCHEUX a proposé un nouveau concept opérationnel susceptible de fournir une première approximation des économies d'énergie réalisables (1).

Il s'agit du potentiel optimal d'économie d'énergie. Il se définit comme la différence entre la consommation d'énergie effective et la consommation optimale du système retenu, système utilisant un équipement de la façon la plus efficace compte tenu de l'état de la technique du moment.

La consommation optimale n'est pas la consommation théorique de Carnot. Le potentiel

(1) S. FAUCHEUX, *L'articulation des évaluations monétaire et énergétique en économie*, Thèse de doctorat en sciences économiques, Paris I, avril 1990, p.155-158

optimal d'économie d'énergie est donc nécessairement inférieur à l'optimum théorique du fait des pertes de transformation. Il peut être représenté de la manière suivante :



Graphique n° 15

- PS : production du système productif en question**
- PE : production de l'équipement considéré**
- CE : consommation d'énergie effective de l'équipement du système**
- CO : consommation énergétique optimale**

$$P = CE - CO$$

L'intérêt de ce concept est qu'il peut prendre en considération le long terme et donc intégrer le renouvellement des équipements. Le progrès technique avec l'apparition des nouvelles techniques - et la disparition des anciennes - dont les effets se cumulent sur le long terme modifie ainsi le potentiel optimal d'économie d'énergie en diminuant constamment la consommation d'énergie effective.

Le système productif doit donc chercher à minimiser ce potentiel optimal.

La consommation énergétique optimale est limitée par une borne supérieure qui est le

coefficient de Carnot. Il est possible de se rapprocher de cette limite supérieure en intégrant le progrès technique.

D'un autre côté, la consommation énergétique effective a pour limite inférieure, une borne fictive strictement supérieure à zéro.

L'énergie est un intrant indispensable au fonctionnement des procédés.

Compte tenu des enseignements de l'approche exergétique, la minimisation du potentiel conduit à augmenter l'efficacité technologique en diminuant l'exergie détruite. Cela suppose une augmentation des rendements exergétiques par la diminution des consommations d'énergie et de matière en retirant une plus grande part de l'exergie contenue dans les ressources. Ex^+ doit donc augmenter.

L'observation des rendements réels montrent qu'il est encore possible de réduire le potentiel et de diminuer la création d'entropie ou destruction d'exergie au sein du système énergétique. Une récente étude réalisée par l'OCDE montre qu'il est possible d'élever considérablement les rendements énergétiques notamment dans l'utilisation finale de l'électricité et dans les transports (1). De tels progrès contribuent à une meilleure efficacité du système énergétique.

Il existe une autre voie pour y parvenir : c'est la mise en oeuvre de processus de recyclage des déchets matériels que le système énergétique libère inexorablement. Conformément à la quatrième loi de la thermodynamique proposée par Georgescu ROEGEN, le recyclage des ressources minérales ne peut être que partiel (2). Nous avons vu que parmi les rejets, seule une partie peut être recyclée : ce sont les "garbojunk" ou matière utilisable dans sa forme inutile. Des processus de recyclage partiel peuvent cependant contribuer à économiser la base de ressources non renouvelable dans les limites imposées par la loi d'entropie : le recyclage est un moyen de ralentir l'augmentation de l'entropie de la biosphère s'il est mis en oeuvre dans des conditions particulières.

M. FABER, H. NIEMES et G. STEPHAN ont étudié à l'aide d'un modèle les interdépendances entre l'environnement et l'utilisation des ressources avec le recyclage et le stockage

(1) OCDE/AIE, *L'énergie et l'environnement : vue d'ensemble des politiques*, 1990, p.144-149.

(2) Se reporter au chapitre 5, Fondements et principes de la thermodynamique.

des déchets et montre dans quelles conditions le recyclage et le stockage devaient être entrepris.

Le recyclage peut être mis en oeuvre de manière efficace dès lors que la concentration de la ressource dans les émissions dépasse la concentration de la ressource dans le secteur environnement (1). Nous avons vu dans un exposé antérieur que l'extraction des ressources s'accompagne d'une diminution de leur concentration dans le secteur environnement (2).

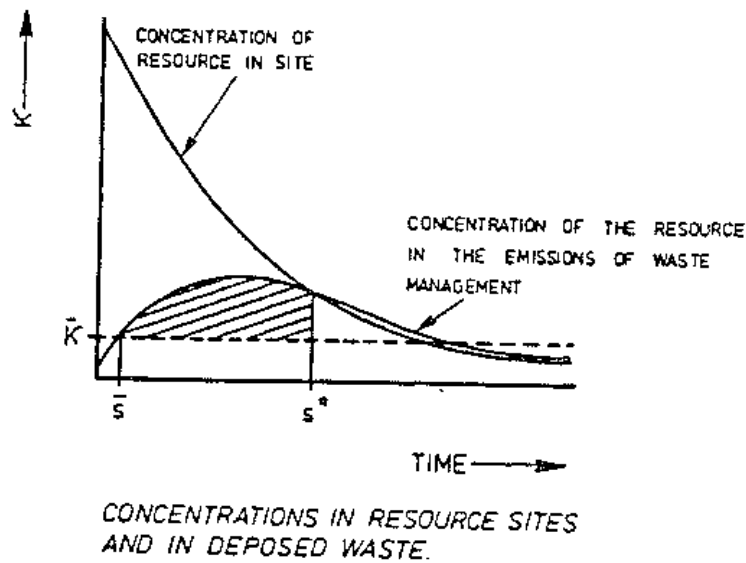
Parallèlement, de plus grandes quantités d'émissions sont libérées, émissions qui contiennent une certaine quantité de ressources dispersées. Peu à peu, la concentration de ressources dans les émissions s'élève relativement à celle du secteur environnement et la dépasse (voir le graphique). En S^* , une production efficace va s'accompagner ainsi du recyclage. Les auteurs considèrent que seules les émissions issues des processus de traitement des déchets sont utilisées pour le recyclage (3). Ils ne prennent donc pas en compte les émissions des processus de production qui pourraient être également recyclées.

Cependant, il apparaît qu'il peut être efficace de recycler avant la période S^* . Attendre la période S^* pour engager une activité de recyclage revient à ne pas utiliser une importante quantité d'émissions (zone hachurée).

(1) M. FABER, H. NIEMES, G. STEPHAN, *Entropy, environment and resources*, 1987, Springer-Verlag, p.173-192.

(2) Se reporter au chapitre 5 de la thèse.

(3) opus cité, p.186.



Source : M. FABER, "A biophysical approach to the economy entropy, environment and resources", in *Energy and time in the economic and physical sciences*, W.VAN GOOL and Al., Elsevier Science publishers B.V., p. 331, 1985

Ainsi, les émissions provenant du traitement des déchets $S^b_4(t)$ retourneraient-elles dans l'environnement sans que leur contenu en ressources ne puisse être récupéré. Ces quantités de ressources se disperseraient dans une forme diffuse et leur concentration serait pratiquement nulle ; inférieure à la concentration minimale \bar{k} de ressource nécessaire pour effectuer un recyclage.

La zone hachurée représente le potentiel assurant une amélioration écologique qui serait ainsi perdue. Du point de vue du stockage des polluants et des déchets matériels, ces considérations suggèrent qu'il devrait être mis en oeuvre rapidement : le stockage des déchets avant la période S^* autorise le recyclage de la matière, des ressources qu'ils contiennent. L'absence de tout stockage implique une perte irréversible des ressources dans l'environnement. Le stockage peut alors constituer une option pour la récupération de substances émises dans des périodes antérieures (1).

(1) opus cité, p.190.

Le recyclage des ressources à partir des stocks peut être efficacement mis en oeuvre si la concentration moyenne de ressources dans les stocks est plus élevée que celle de la concentration de la ressource dans l'environnement.

Ainsi, le stockage des déchets et le recyclage constituent 2 moyens efficaces pour réduire l'entropie du secteur environnement. Du fait de la diminution de la concentration de la ressource dans l'environnement, l'exploitation des gisements naturels devient finalement inefficace. Dans ces conditions, le stock de matériaux collecté permet de prolonger la période d'application des techniques de production fonctionnant avec les ressources épuisables.

L'activité de recyclage contribue ainsi à une amélioration de l'efficacité du système énergétique en économisant les ressources et préserve l'environnement. Deux exemples peuvent illustrer ces propos : on estime que l'élaboration d'une tonne d'acier à partir de ferraille au lieu de minerai de fer permet de réaliser une économie de 1 500 kwh. Dans le cas du cuivre, les économies d'énergie sont colossales : 1 700 kwh par tonne produite à partir de ferraille contre 13 500 kwh par tonne élaborée à partir de minerai (1).

Dans ces conditions, un système énergétique soutenable doit s'accompagner des technologies les plus efficaces aussi bien dans la transformation de la base non renouvelable que dans le recyclage et le stockage des déchets matériels. Le vecteur technologique a donc un rôle essentiel à jouer dans le ralentissement de l'entropie de la biosphère. Il suppose que des choix technologiques soient opérés sur la base d'une plus grande efficacité énergétique. Mais la technologie ne peut pas tout. Le système énergétique soutenable doit aussi compter sur sa base de ressources renouvelables, seule source abondante de basse entropie.

Cela suppose d'opérer des substitutions interénergétiques de façon à préserver les ressources fossiles sans compromettre le développement des sociétés.

(1) OCDE/AIE, opus cité, p.178.

Section 2 - L'exploitation du gisement potentiel de maîtrise énergétique

§ 1 - Champ de substituabilité et potentiels technologiques

Le développement d'un système énergétique soutenable s'inscrit nécessairement dans un contexte mondial où les différents systèmes économiques, sociaux, politiques sont en perpétuelle évolution. En prenant en compte les impacts sur la biosphère liés à l'utilisation des ressources énergétiques, nous allons définir et étudier les champs de substituabilité possibles entre les différentes sources d'énergie dans le cadre d'un développement différencié des sociétés humaines. L'évolution énergétique des pays en développement ne peut être conçue comme la simple reproduction de celle des pays aujourd'hui industrialisés. Deux facteurs essentiels pour nous sont de ce point de vue susceptibles d'appuyer cette idée.

Le premier facteur est la croissance de la population dans le Tiers Monde. Le développement du Tiers Monde en entraînant l'augmentation des besoins énergétiques implique une plus forte pression exercée sur les ressources non commerciales (bois surtout) et sur les ressources fossiles. Il apparaît alors un problème d'adéquation des ressources naturelles exploitables avec une population en constante augmentation au cours du prochain siècle (1). Le second facteur est l'utilisation quasi-exclusive des ressources fossiles par les pays industrialisés, base monolithique de leur développement. La résultante est la responsabilité historique absolue des pays développés dans l'accumulation du CO₂ atmosphérique dont 80 % des émissions anthropomorphiques incombent à la combustion des ressources fossiles.

Dans les années à venir, leur part dans les émissions devrait passer à 40 % à l'horizon 2050. Inversement, la part des pays en développement devrait augmenter de 20 % à 40 % (2). Le recours aux seules ressources fossiles pour assurer le développement des pays en développement n'est donc pas souhaitable à moyen et long terme. Les recommandations du rapport Brundtland vont dans ce sens. La pénurie de bois de feu, l'élévation du CO₂ généré par l'utilisation de combustibles fossiles, seront observées dans les pays en développement en l'absence d'améliorations relatives à l'efficacité énergétique des technologies- améliorations qui ont contribué à la diminution des consommations d'énergie primaire dans les pays industriels- et en l'absence de nouveaux approvisionnements énergétiques (3).

(1) J. THEYS, "L'environnement et les ressources au 21^{ème} siècle", *Futuribles*, novembre 1987, p.3-24.

(2) S. FAUCHEUX, J-F NOEL, *Les menaces globales sur l'environnement*, La découverte, 1990, p.69.

(3) Commission mondiale sur l'environnement et la développement, *Notre avenir à tous*, Ed. du fleuve, 1988, p.205-208.

Nous allons ainsi définir des champs de substitutivité relativement à un usage énergétique particulier. Il existe plusieurs catégories d'utilisation. Nous retiendrons : la chaleur, le besoin d'électricité et la force motrice. La définition du potentiel de maîtrise de l'énergie suppose de plus de retenir un ensemble de technologies disponibles à moment donné sur le marché. Parmi elles, nous choisirons un ensemble de technologies telles qu'elles correspondent à l'un des deux types -ou aux deux- d'innovations suivant : les innovations d'économie et les innovations de substitution.

Nous empruntons ces deux définitions à N. GEORGESCU-ROEGEN (1). N. GEORGESCU-ROEGEN définit les innovations d'économie comme des innovations permettant une économie nette de basse entropie. Cette économie est possible lorsque l'efficacité exergétique est améliorée (meilleure combustion, diminution des frottements, ..). Dans cette catégorie d'innovations, figure l'apparition de nouveaux procédés d'utilisation de basse entropie accessible. Les techniques énergétiques "propres" sont des innovations d'économie particulières. Par définition, elles sont des techniques qui conjuguent des procédés à meilleur rendement énergétique et une réduction de la production de polluants sans changer nécessairement de forme d'énergie utilisée (2). En augmentant le rendement des procédés de fabrication, elles préviennent l'émission de polluants ou la production de déchets et donc évitent une perte nette de matières premières. Un grand nombre de techniques énergétiques "propres" présente un intérêt pour la protection de l'atmosphère, dont notamment la combustion des combustibles fossiles en lit fluidisé ou en cycle combiné (3). Les innovations de substitution sont définies comme des innovations qui remplacent l'énergie humaine par l'énergie physico-chimique. L'évolution des convertisseurs énergétiques avec l'abandon de la force humaine ou animale reflète la succession de telles innovations qui ont bouleversés les sociétés humaines. Il s'agit des technologies des énergies renouvelables.

Un champ de substitutivité est donc une mesure, à un instant "t", des possibilités de remplacement par rapport à un usage donné, des sources rares de basse entropie par des sources plus abondantes dont la limite repose sur un potentiel technologique - ou ensemble d'innovations d'économie et d'innovations de substitution au sens de N. GEORGESCU-ROEGEN- potentiel (ce potentiel comprend l'ensemble des technologies disponibles sur le

(1) N. GEORGESCU-ROEGEN, *Energy and economic myths*, Pergamon press, 1976, p.18.

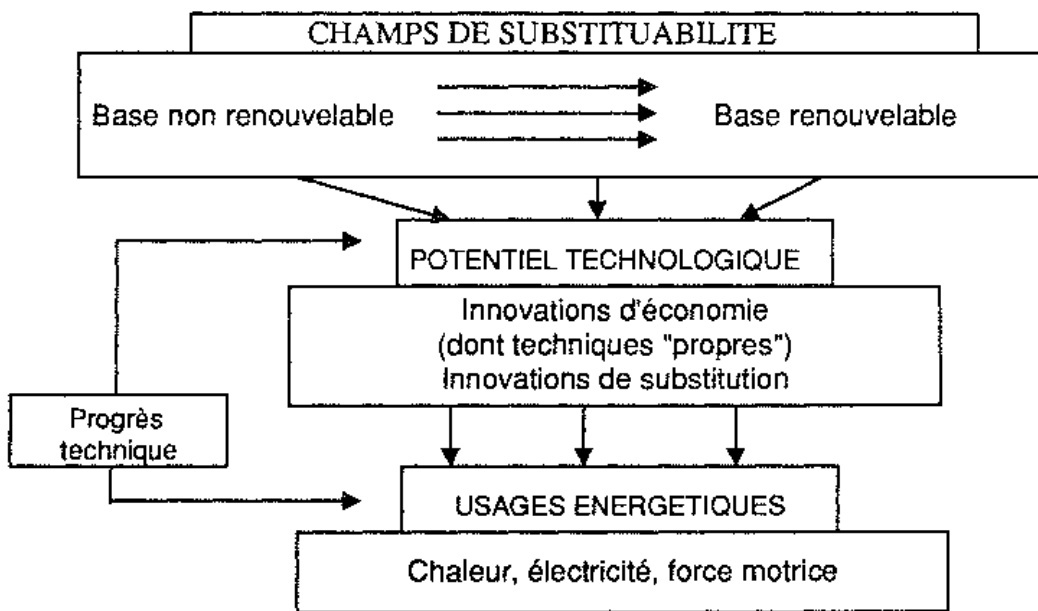
(2) OCDE/AIE, *L'énergie et l'environnement : vue d'ensemble des politiques*, 1990, p.175-182. Les techniques énergétiques "propres" se rattachent à la production et à l'utilisation de l'énergie.

(3) Se reporter au chapitre 2 de la thèse, section 1, §4.

marché) qui évolue avec le progrès technique. Ce champ est défini dans l'espace par rapport à des besoins énergétiques localisés qui diffèrent selon le niveau de développement atteint par une société.

Globalement, l'ensemble des champs de substituabilité ainsi définis constitue le gisement potentiel de maîtrise énergétique (voir schéma). Nous allons à présent définir quels sont aujourd'hui les champs de substituabilité compte tenu du potentiel technologique dont dispose l'humanité.

GISEMENT POTENTIEL DE MAITRISE ENERGETIQUE

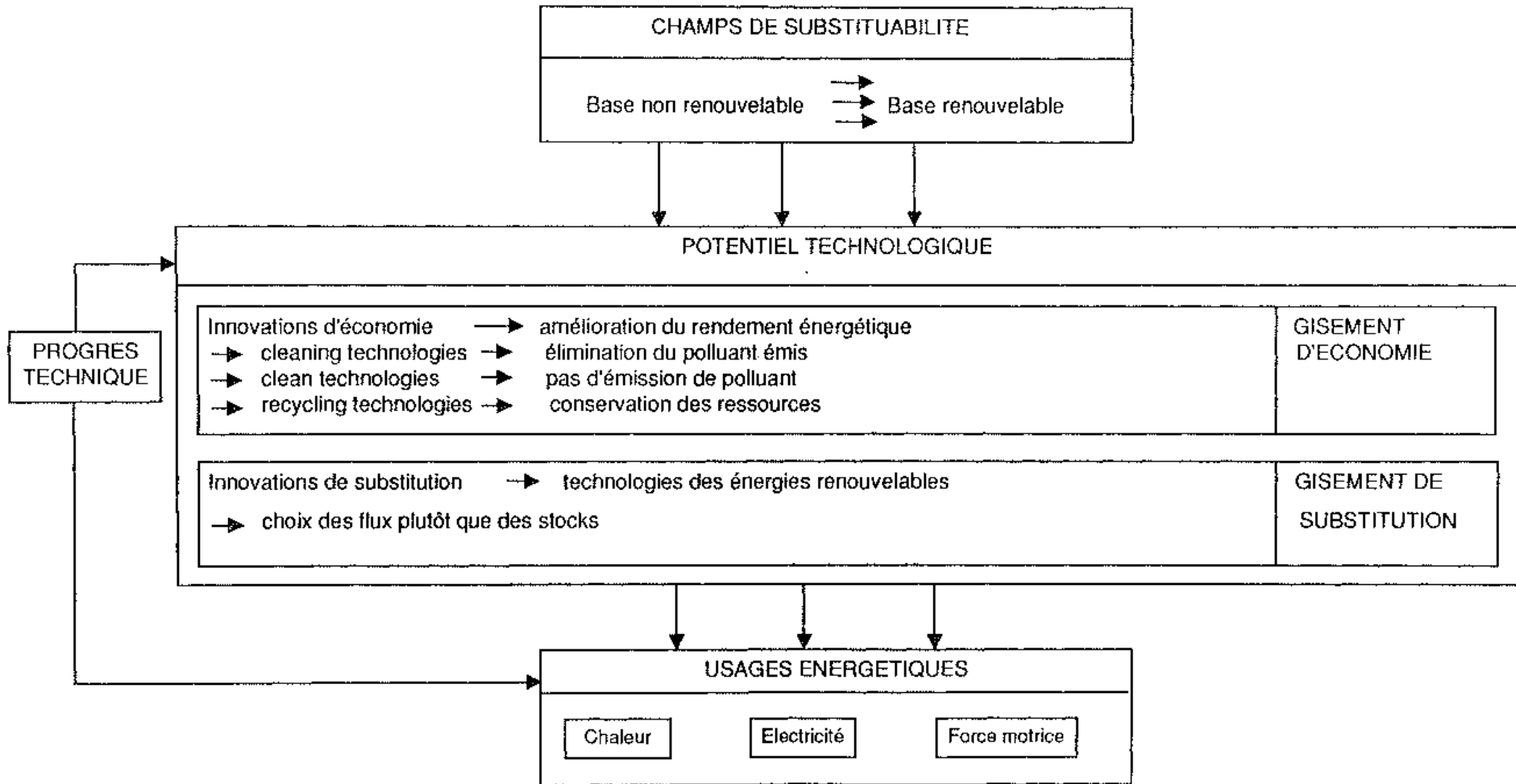


Dans la définition d'un champ de substituabilité, nous ne prenons pas en compte les substitutions possibles entre les ressources énergétiques au sein de la base non renouvelable. De telles substitutions existent actuellement et pourraient être rapidement mises en oeuvre dans le but de mieux préserver l'environnement.

Nous pouvons préciser par exemple, les grands traits des possibilités de substitutions relatives à l'électricité dans l'OCDE.

Pour la production d'électricité, on constate qu'entre 1973 et 1987 dans les pays de l'OCDE la part de l'électricité produite à partir de pétrole et de gaz naturel est passée de 38 % à 17 % tandis que celle relative au charbon et à l'énergie nucléaire progressait de 42 % à 64 %. Cette évolution traduit bien la concurrence qui existe entre les combustibles différents.

GISEMENT POTENTIEL DE MAITRISE ENERGETIQUE



Selon une récente étude prospective réalisée par l'AIE, la part du pétrole dans la production d'électricité devrait continuer à diminuer d'ici 2005 tandis que celles relatives au charbon, au gaz naturel et à l'énergie nucléaire devraient augmenter (1). Par ailleurs, il existe une forte concurrence entre le gaz naturel d'une part et le charbon et le pétrole d'autre part. En effet, la majeure partie des installations consommant du pétrole ou du charbon dans l'industrie et dans la production d'électricité, pourrait être aisément modifiée pour utiliser le gaz naturel en continu ou en discontinu.

Le gaz naturel pourrait être ainsi concurrentiel dans de nombreux pays de l'OCDE si de nouvelles méthodes de production pouvaient se généraliser. Nous pensons ici à la diffusion des turbines à gaz à cycle combiné dont le rendement est plus élevé (50 % contre des rendements de l'ordre de 35 % pour les centrales thermiques au charbon et au fuel). De plus, l'usage du gaz naturel permet de réduire les émissions de NOX et de CO2 ; il ne produit pas de SO2 par ailleurs. Alors que les centrales au gaz naturel ne représente que 9,3 % de la production d'électricité dans les pays de l'OCDE en 1987, le champ de substituabilité est donc très étendu.

Pour l'utilisation finale de l'électricité, l'électricité s'est substituée à d'autres combustibles fossiles. La part de l'utilisation finale de l'électricité dans l'utilisation finale de l'énergie ne cesse d'augmenter depuis 1973 dans les pays de l'OCDE. La majeure partie de cette hausse de la consommation d'électricité s'explique par l'expansion des services, services assurés par des équipements électrotechniques (éclairage, réfrigération, équipements motorisés fixes). L'électricité a concurrencé d'autres formes d'énergie (charbon, gaz naturel, fuel surtout) utilisées pour le chauffage de locaux, la production d'eau chaude ou encore la fabrication de produits chimiques. Dans l'industrie, le développement de systèmes bi ou pluri-énergies permet de passer avec souplesse du fuel au gaz naturel et même au charbon et d'associer l'électricité à une énergie d'origine fossile. Ces systèmes associent à une chaudière à combustible -stockable classique - une chaudière électrique qui ne fonctionne que pendant les heures creuses. L'utilisation de l'électricité concurrence ainsi le fuel, le gaz naturel ou le charbon dans des usages thermiques.

L'exemple de l'électricité dans les pays de l'OCDE, montre qu'en amont - au niveau du producteur - comme en aval - au niveau du consommateur - il est possible de considérer le champ des substitutions potentielles compte tenu de l'évolution technologique.

(1) OCDE/AIE, opus cité, p.166-167.

Au niveau de la consommation d'énergie finale, J.M MARTIN considère que 55 % d'usages sont substituables alors que 45 % sont des usages spécifiques (1). Ainsi, on observe :

- 5 % d'usages spécifiques réservés au charbon dans la sidérurgie et la carbochimie
- 20 % d'usages spécifiques réservés au pétrole sous forme de carburants et de matières premières
- 20 % d'usages spécifiques réservés à l'électricité pour l'éclairage, l'électrolyse et les usages mécaniques fixes.

Les usages substituables correspondent quant à eux essentiellement à des usages thermiques (haute et basse température). C'est dans ces limites que les substitutions inter énergétiques, au niveau de la base non renouvelable, peuvent ainsi s'opérer.

Cependant, il importe pour nous d'opérer non pas des substitutions au sein de la base non renouvelable mais entre la base renouvelable et la base non renouvelable. Cela constitue un moyen d'action efficace pour participer au ralentissement de l'entropie de la biosphère. On peut considérer aujourd'hui que l'exploitation des ressources renouvelables, compte tenu du potentiel technologique dont on dispose, pourrait apporter jusqu'à 5 Gtep par an (2). Cela représente plus des deux tiers de la consommation (finale) totale d'énergie du monde en 1990.

Il est dans ces conditions possible de s'interroger sur l'étendue des champs de substituabilité des énergies non renouvelables vers les énergies renouvelables. Nous allons pour chaque usage considérer quelles sont les ressources fossiles utilisées et quelles sont les ressources renouvelables susceptibles de les concurrencer.

La consommation finale d'énergie dans le monde se répartie entre trois grands secteurs d'activité économique.

(1) J-M MARTIN, *L'économie mondiale de l'énergie*, Ed. la découverte, 1990, p.16.

Les usages spécifiques sont des usages qui ne peuvent être satisfaits que par une seule source d'énergie.

(2) J-M MARTIN, opus cité, p.107.

D'après les travaux de B. DESSUS, Les réserves renouvelables totales s'élèvent à 6 Gtep.

Consommation finale d'énergie dans le monde par secteur d'activité économique

(en Mtep) 1987	Combustibles minéraux solides	Pétrole et produits pétroliers	Gaz naturel	Electricité	Biomasse et autres sources	Total
Industrie	691	540	545	367	226	2 369
Transport	25	1 257	2	17	1	1 302
Résidentiel tertiaire-agriculture	312	491	389	375	641	2 208
Cons.finale totale	1 028	2 288	936	759	868	5 879

Source : D'après MARTIN J.M., opus cité.

L'industrie et le résidentiel-tertiaire absorbent chacun 40 % de l'énergie finale, contre 20 % pour le

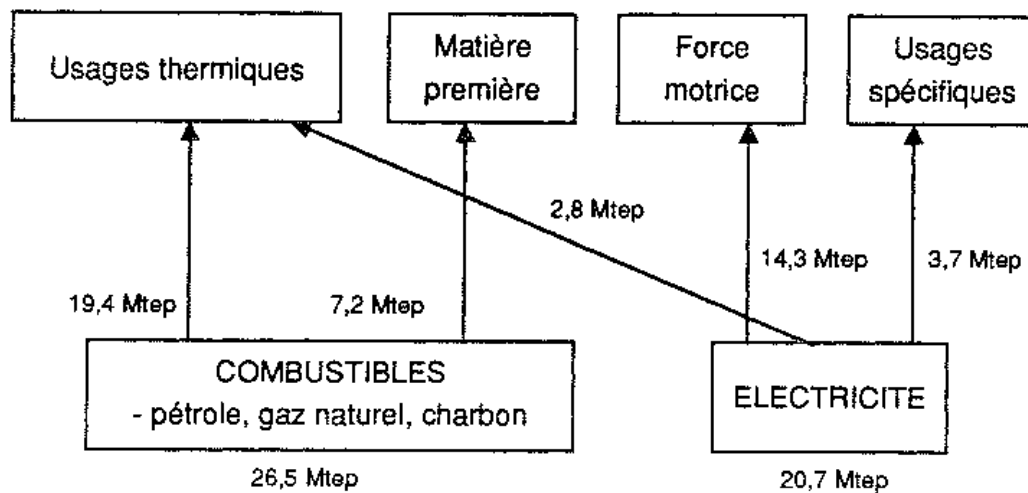
secteur des transports (1). Il est évident qu'il existe de grandes différences d'une région du monde à une autre compte tenu des différents niveaux de développement. L'emploi de sources d'énergie renouvelables demeure marginal : à peine 10 % de la consommation finale dans l'industrie, insignifiant dans les transports. Seul le secteur résidentiel-tertiaire-agriculture y recourt de manière significative : 29 % de la consommation finale totale. Finalement, la part des ressources non fossiles dans la consommation finale s'élève à 14,8 % ce qui constitue une très modeste contribution ! Nous pouvons donc espérer faire progresser la base renouvelable dans la consommation d'énergie. Au sein de chaque secteur d'activité, il est possible d'identifier des champs de substituabilité même si certains usages demeurent relativement spécifiques.

(1) Le résidentiel comprend l'habitat individuel et collectif ; le tertiaire correspond à l'ensemble des activités de services.

A- L'Industrie

Dans l'industrie, les principaux usages de l'énergie sont des usages thermiques, des usages mécaniques, des usages non énergétiques et des usages spécifiques. Parmi les usages thermiques, on distingue les usages à basse et moyenne température qui correspondent à la production de vapeur et d'eau chaude dans les chaudières, au chauffage des locaux, au séchage des produits ..., des usages haute température (+ de 300° C). Ces derniers permettent la fusion des métaux, la synthèse de produits chimiques et l'élaboration de matériaux de construction. Un autre usage important est constitué par la force motrice employée au broyage des minerais et à l'usinage de pièces métalliques. Les usages non énergétiques correspondent à l'utilisation des combustibles en tant que matière première. Les usages spécifiques sont relatifs à l'énergie électrique et à son utilisation pour l'éclairage, l'électrolyse.

En France, en 1987, la consommation d'énergie dans l'industrie selon les usages est la suivante : (1)



Il existe des différences entre les diverses branches de l'industrie : on observe d'un côté les industries grosses consommatrices d'énergie telles que la sidérurgie, la chimie, les métaux non ferreux, papier carton, les matériaux de construction, les I.A.A. et d'un autre côté des industries peu consommatrices telles que les matières plastiques, la parachimie, la construction électronique et électrique.

(1) D'après SESSI, *L'industrie et l'énergie en 1987, principaux résultats de l'enquête annuelle*.

Cependant, même si la consommation finale d'énergie en France a diminué depuis 1973, il est possible d'envisager une diminution de l'input énergétique d'origine fossile. Tout d'abord, le recyclage des déchets de fabrication est un moyen efficace puisqu'il permet de réduire la consommation d'énergie, la transformation des matières premières en matériaux de base est l'étape de fabrication la plus coûteuse en énergie. En France, 40 % des matières premières de la sidérurgie proviennent du recyclage des déchets, 44 % des pâtes à papier sont également des matériaux recyclés (1). Aux côtés du recyclage, nous pouvons envisager une contribution directe des énergies renouvelables dans certains usages. Nous nous intéressons ici plus particulièrement aux industries agroalimentaires. Sur les 26,5 Mtep de combustibles consommés par l'industrie, 10 % concernent les I.A.A. ; cette proportion est sensiblement supérieure pour la consommation d'électricité.

La particularité de ces industries est de libérer dans l'environnement des quantités non négligeables de matières organiques sous forme de déchets ; déchets traités par des procédés de dépollution. Or, ces effluents pourraient être traités par un processus de méthanisation. Ce procédé consiste en une fermentation anaérobie des matières organiques dans un digesteur. Le résultat de la fermentation est l'obtention d'un combustible à teneur élevée en méthane : le biogaz. Le biogaz produit peut être ainsi utilisé pour la production de vapeur ou d'eau chaude nécessaires au fonctionnement des procédés (usages thermiques).(2)

La méthanisation permet de réduire le coût énergétique du traitement des rejets. Elle offre de plus la possibilité de produire un sous produit valorisable sur le plan énergétique. En effet, non seulement des économies sur le fonctionnement des installations de dépollution sont possibles mais encore la récupération du biogaz produit peut permettre une valorisation énergétique des matières polluantes (3). Le traitement des effluents produits par les I.A.A. est un marché porteur pour les processus de méthanisation. Ce marché d'ailleurs ne concerne pas les I.A.A. de manière exclusive. Certaines industries -chimie organique, papeterie - rejettent des effluents méthanisables. (4)

(1) M. ROSS, D. STEINMEYER, "L'énergie industrielle", *Pour la science*, n° spécial, l'énergie, nov. 1990, p.58-66.

(2) C. JANET, A. REYNAUD, Bilan des valorisations énergétiques de biomasse en France, *Economie et sociologie rurales*, INRA, octobre 1985, p.114.

(3) P. CHARTIER et al., "Le biogaz : état actuel et perspectives de développement", *Conférence mondiale de l'énergie*, 1986, p.1-24.

(4) En 1989, on dénombre 20 installations de méthanisation en France. Les déjections animales et les boues des stations d'épuration sont en partie destinées à la production de biogaz. D'après *les chiffres clés de l'énergie*, Ministère de l'industrie, Dunod, 1992.

Par ailleurs, le biogaz peut remplacer des combustibles fossiles au niveau des brûleurs industriels de manière partielle (en appoint d'une autre énergie). Là encore, il s'agit d'usages thermiques.

Une contribution indirecte de la base renouvelable est aussi envisageable pour répondre à un plus grand nombre de besoins énergétiques. Elle consiste d'abord à s'interroger sur l'origine de l'électricité utilisée dans l'industrie mais aussi dans les autres secteurs d'activité. En 1987, la production mondiale d'électricité est la suivante :

PRODUCTION MONDIALE D'ÉLECTRICITÉ
(1987)

	<i>Pays OCDE (TWh)</i>	<i>Autres pays (TWh)</i>	<i>Total (TWh)</i>	<i>Pays OCDE (%)</i>	<i>Autres pays (%)</i>	<i>Total (%)</i>
<i>Production primaire</i>						
hydraulique	1 175	893	2 068	18,8	20,5	19,5
nucléaire	1 396	343	1 739	22,4	7,9	16,4
géothermie	—	11	11	—	0,3	0,1
<i>Production secondaire*</i>						
charbon	2 544	1 581	4 125	40,8	36,3	39,0
fuel-oil	515	731	1 246	8,3	16,8	11,8
gaz naturel	579	762	1 341	9,3	17,5	12,7
autres	25	29	54	0,4	0,7	0,5
<i>Total</i>	<i>6 234</i>	<i>4 350</i>	<i>10 584</i>	<i>100,0</i>	<i>100,0</i>	<i>100,0</i>

Source: ENERDATA.

* La production secondaire d'électricité correspond au thermique classique (centrales à combustibles).

On observe que 39 % de la production mondiale est assurée par le charbon contre seulement 19,5 % pour l'hydraulique, 0,1 % pour la géothermie et 0,5 % pour la combustion du bois et d'ordures ménagères. Le poids des ressources fossiles est écrasant : c'est près de 80 % de cette production qui est assurée par la base non renouvelable (y compris le nucléaire, filière classique).

Parmi la base renouvelable, seule la ressource hydraulique occupe une place déterminante. Compte tenu de ces remarques, la production d'électricité contribue fortement à l'accroissement des rejets atmosphériques d'oxydes de carbone, d'azote et de soufre.

Ne serait-il pas possible, compte tenu de l'importance de l'électricité dans les activités économiques de substituer une base renouvelable à la base fossile et de réduire ainsi à la fois la pression sur les dotations finies et leurs effets sur l'environnement ?

Une récente étude réalisée par l'OCDE précise que des ressources telles que la géothermie, la biomasse, le solaire, l'hydraulique et l'éolien sont susceptibles de contribuer davantage à la production d'électricité dans les années à venir. Cependant, d'ici 2005, les centrales éoliennes photovoltaïques et héliothermiques ne devraient couvrir qu'un faible pour-

centage des besoins en énergie électrique de l'OCDE (1). Au niveau de l'OCDE, la seule ressource renouvelable qui pourrait contribuer de manière significative à la production d'énergie électrique est la biomasse. Les ressources potentielles sont en effet abondantes (2). La combustion directe n'est pas cependant une valorisation "idéale" (3) Par contre, sa transformation par un procédé de méthanisation en biogaz, permettrait de l'utiliser plus largement pour la production d'électricité. Il existe déjà dans le monde une utilisation des déchets urbains (ordures ménagères) et agricoles à des fins de production de biogaz.

Le développement du biogaz suppose que les consommateurs potentiels se situent à proximité des installations appropriées. Localement, le biogaz peut être donc utilisé pour faire fonctionner des groupes électrogènes. Cependant, de grandes unités générant de grandes quantités de biogaz sont susceptibles de diriger l'électricité produite sur des réseaux.

L'observation du potentiel technologique fait apparaître des inégalités dans le stade d'avancée des technologies.

Ainsi, les rendements de la transformation du biogaz en énergie électrique se situent entre 25 et 30 %. Par contre au niveau de la production d'électricité d'origine hydraulique les rendements des turbines hydrauliques de grande taille sont très élevées : de l'ordre de 95 %. La technologie des petites turbines progresse rapidement, ce qui permet d'envisager l'équipement de sites de petite taille dans une grande partie du monde (4) ; le marché de la petite hydraulique progresse constamment.

Au niveau de l'énergie éolienne, les rendements se sont nettement améliorés grâce à des améliorations technologiques (augmentation de la taille moyenne des turbines). La disponibilité a pu augmenter jusqu'à 90 % ainsi que les coefficients d'utilisation de la capacité. Il apparaît que l'énergie éolienne à grande échelle pose encore des problèmes technique (éoliennes dépassant 1 Mégawatt). Par contre, de petites installations (10 à 100 kw) se révèlent très satisfaisantes pour des applications en site isolé. Elles peuvent localement faire fonctionner des groupes électrogènes.

(1) OCDE/AIE, opus cité, p.167.

(2) OCDE/AIE, *Sources d'énergie renouvelables*, 1987, p.237-240.

(3) J; LUCAS, "Filières pour la biomasse énergétique, CEMAGREF, BTMEA, n°15-16, mars-avril 1987, p.45-49.

(4) B. DESSUS, *Incertitudes et promesses technologiques à long terme dans le domaine énergétique*, 1989.

Concernant la conversion thermique de l'énergie solaire dans les centrales hélio-thermiques pour la production d'électricité, elle s'appuie sur deux technologies essentiellement : les miroirs paraboliques et les bassins solaires. Parmi elles, les miroirs cylindro-paraboliques constituent une technologie prometteuse pour l'avenir. (1) La conversion en électricité dans les systèmes électriques à miroirs paraboliques a progressé : un rendement de 52,6 % a été obtenu sur la plus grande unité de démonstration se trouvant aux USA.

Quant à la production d'électricité par voie photovoltaïque, il existe deux filières principales : la filière silicium cristallin et la filière silicium amorphe. Les rendements des cellules photovoltaïques varient entre 10 et 24 % selon la technologie mise en oeuvre. Ces rendements ne cessent de s'améliorer. Ainsi, les rendements susceptibles d'être atteints s'élèvent de 15 à 30 % selon le type de cellule. De plus, la constante diminution des coûts des photopiles conduit à envisager des applications du photovoltaïque dans 2 directions majeures : l'alimentation autonome des services électriques et la substitution aux petits groupes thermiques (de puissance inférieure à 20-50 kw). (2)

Pour B. DESSUS, il existe des perspectives réelles de généralisation des filières photovoltaïques, essentiellement dans les zones rurales des pays du Sud. Mais cela n'exclut pas leur diffusion dans les pays industriels.

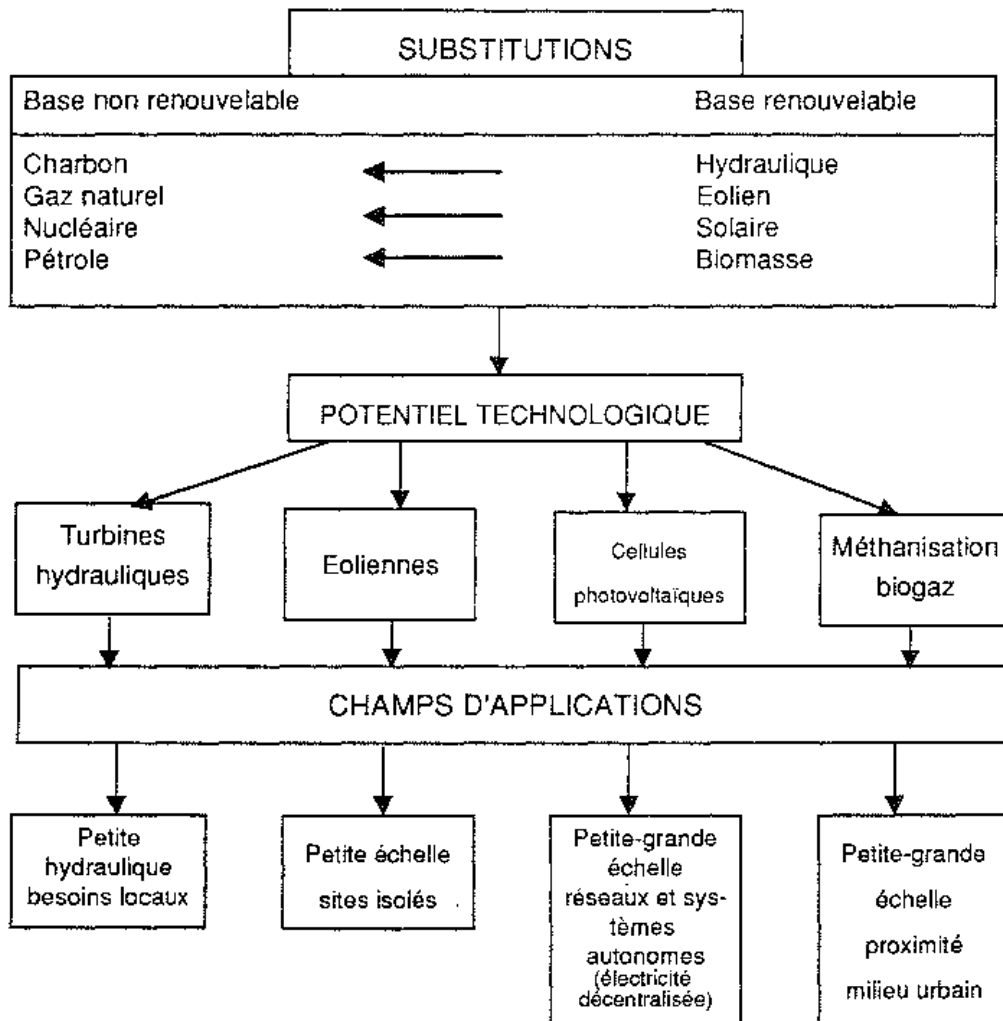
Le développement de l'énergie photovoltaïque peut offrir une production d'électricité pour alimenter les réseaux électriques déjà existants et aussi les systèmes autonomes, non reliés aux réseaux.

Ainsi, au niveau de la production d'électricité il est possible d'envisager à des degrés plus ou moins importants des substitutions favorisant l'emploi de ressources renouvelables. Nous pouvons les résumer à l'aide du schéma suivant :

(1) OCDE/AIE, *Sources d'énergie renouvelables*, 1987, p.158-164.

(2) B. DESSUS, opus cité, p.53.

Gisement potentiel de maîtrise énergétique associé à l'électricité



Ainsi, au niveau du secteur industriel, des substitutions sont possibles au niveau des consommations de combustibles avec l'emploi de biogaz dans les chaudières pour satisfaire des usages essentiellement thermiques. Du côté de la consommation d'électricité, des substitutions indirects sont envisageables en amont, au niveau de la production avec le recours plus large à l'hydraulique, à l'énergie photovoltaïque, au biogaz et à l'énergie éolienne.

B - Résidentiel, tertiaire et agriculture

En ce qui concerne le résidentiel-tertiaire et l'agriculture, ce secteur d'activité a une consommation d'énergie comparable à celle de l'industrie. Alors que 75 % de la consommation d'énergie de l'industrie est relatif aux combustibles fossiles, cette part dépasse à

peine 50 % pour ce secteur. L'originalité du résidentiel-tertiaire et de l'agriculture est de recourir pour la satisfaction des besoins énergétiques aux ressources renouvelables à hauteur de 30 %. Sur un total de 868 Mtep de Biomasse consommée dans le monde en 1987, plus de 70 % concerne le résidentiel-tertiaire et l'agriculture.

La consommation de biomasse - bois, déchets animaux et déchets agricoles - échappe cependant en grande partie au circuit de commercialisation. D'où une sous-évaluation systématique dans les pays développés comme dans les pays en développement. En France, par exemple, la part de la biomasse dans le bilan énergétique s'élève à 3 Mtep par an mais sa contribution réelle s'élèverait à plus de 7 Mtep (1). Cependant, si en France comme dans la plupart des pays industrialisés, les surfaces boisées progressent chaque année et donc le "gisement" de bois, la situation est préoccupante dans de nombreux pays en développement où le bois de feu se raréfie du fait essentiellement des pressions exercées par l'accroissement des populations.

Dans la plupart des pays d'Afrique, d'Asie et d'Amérique Latine, la part du bois et du charbon de bois dans la consommation finale d'énergie du secteur résidentiel est considérable (pour l'année 1980) : 73 % pour le Sénégal, 95 % pour le Bénin, 70 % pour les Philippines, 70 % pour le Brésil. Cette situation est une caractéristique propre au sous-développement dans le monde rural mais aussi dans les villes du tiers monde. (2)

Dans les pays industriels, la part de l'ensemble des ressources renouvelables dans le résidentiel-tertiaire est très modeste : en 1986, leur contribution dans le secteur résidentiel en France était de 6 %, contre 1 % seulement pour le secteur tertiaire.

(1) J-M MARTIN, opus cité, p.15.

(2) B. DUHAMEL, "La prépondérance des combustibles ligneux et la planification énergétique dans les pays du tiers-monde", *Conférence mondiale de l'énergie*, Cannes, 1986, p.1-22.

Part des énergies dans la consommation finale
des secteurs résidentiel et tertiaire en France (1986)

en %	Résidentiel	Tertiaire
Pétrole	30	22
Electricité	40	60
Charbon	5	2
Gaz naturel	19	15
Energies renouvelables	6	1
Energies (Mtep)	49,2	22,1

Sources : AFME

Dans le résidentiel-tertiaire et l'agriculture, les usages énergétiques correspondent aux besoins d'éclairage, de cuisson, de chauffage. Les besoins de cuisson des aliments et de chauffage de l'eau, du chauffage des habitations constituent l'ensemble des usages thermiques relatifs à ce secteur, usages largement substituables. D'un autre côté, l'éclairage constitue un usage plutôt spécifique réservé à l'électricité tout comme l'emploi d'équipements électroménagers. Concernant les usages thermiques, là encore la situation est très variable selon les pays. En 1986, dans le secteur résidentiel-tertiaire français, les usages thermiques représentent 75 % de la consommation finale d'énergie. Dans les pays en développement, cette part peut atteindre 90 %.

La satisfaction de ces besoins est largement le fait des ressources non renouvelables dans les pays industrialisés alors que dans les pays en développement, ce sont les ressources renouvelables qui sont -parfois trop- sollicitées. Dans ces conditions, quels sont les champs de substitutalité associés aux différents usages ?

Les usages thermiques peuvent être satisfaits par l'énergie solaire, la biomasse ainsi que la géothermie. Le potentiel technologique disponible s'établit de la manière suivante . Concernant l'énergie solaire, la technologie des capteurs plan, déjà appliquée dans de nombreux pays (USA, AUSTRALIE, EUROPE, JAPON), est en constante progression. Depuis 1977, leur rendement s'est accru de 30 % (1). Ils sont utilisés pour la production d'eau chaude sanitaire, pour le chauffage des piscines et des locaux, pour l'alimentation des planchers chauffants dans l'habitat individuel ou encore pour la climatisation des lo-

1) OCDE/AIE, *Sources d'énergie renouvelables*, 1987, p.110.

caux.

La biomasse permet elle aussi de couvrir les usages thermiques de différente manière. La combustion directe du bois est un procédé simple largement utilisé dans de nombreux pays. Cependant, les processus traditionnels de conversion utilisés dans les pays en développement notamment ont de très mauvais rendements (1). Des progrès ont été réalisés sur les chaudières à bois pour l'habitat individuel dont le rendement de combustion est supérieur à 80 %. Les ressources ligneuses par simple combustion peuvent ainsi fournir de la chaleur pour la cuisson des aliments et le chauffage. On peut également envisager leurs transformations par pyrolyse afin d'obtenir un meilleur combustible. Des plaquettes réalisées à partir de bois ou des granulés à partir de déchets (sciures, paille, ordures ménagères) permettent d'obtenir de la chaleur de manière plus performante.

Au côté du bois, la récupération des déchets organiques présente un grand intérêt pour les usages thermiques. Le biogaz obtenu par méthanisation des déchets agricoles et urbains peut produire de la chaleur dans de bonnes conditions. Des digesteurs alimentés par des produits de départ issus de la biomasse peuvent être installés dans des zones rurales ou urbaines. En zones rurales, ce sont les déchets agricoles (déchets de cultures, déchets d'élevage, fumiers, lisiers) qui sont sollicités. Par contre, en zone urbaine, ce sont essentiellement les déchets composés d'ordures ménagères et les boues de stations d'épuration.

Enfin, concernant la géothermie, cette ressource demeure très localisée, ce qui empêche toute généralisation spatiale de son développement. En France, à la fin de l'année 1987, plus de 200 000 logements étaient raccordés à des réseaux de chaleur alimentés par l'énergie géothermique. Dans la majorité des pays qui exploitent la ressource géothermique, les utilisations finales principales concernent le chauffage urbain et la climatisation des locaux ainsi que l'électricité (surtout en Italie, au Japon et au USA).

Le secteur résidentiel-tertiaire et le secteur agricole peuvent ainsi substituer partiellement des ressources renouvelables aux ressources fossiles pour les usages thermiques : l'énergie solaire et la biomasse constituent les 2 ressources sur lesquelles cette substitution peut s'opérer largement.

Concernant enfin les usages spécifiques réservés à l'électricité (éclairage et électroménager), il est cependant possible d'envisager une contribution du biogaz dans des zones iso-

(1) B. DUHAMEL, opus cité, p.12.

lées (gaz d'éclairage et gaz utilisé pour fonctionnement de groupes électrogènes). Après avoir tenté de préciser les champs de substituabilité associés aux usages dans l'industrie, le résidentiel-tertiaire, l'agriculture, nous allons à présent nous intéresser au secteur des transports.

C - Les transports

Ce secteur offre une particularité par rapport à ceux déjà étudiés : 97 % de l'énergie finale consommée est issue du pétrole. Ce secteur est totalement tributaire des produits pétroliers (essence, gaz oil, kérozène, fuel). La moitié du pétrole consommée dans le monde est absorbée par ce secteur.

Au niveau de ce secteur, il n'existe qu'un usage énergétique : il s'agit de la force motrice mobile. On peut distinguer 4 catégories de moyens de transports : les transports routiers, transports maritimes et fluviaux, transports ferroviaires et urbains, et les transports aériens.

Parmi ces 4 catégories, les transports routiers ne cessent d'augmenter : en moyenne, dans le monde, le nombre d'automobiles augmente de 4,7 % par an et celui des camions et autobus de 5,1 % par an. (1) Il en va de même pour les transports aériens.

Le développement du mode de transport routier et le déclin des autres modes de transport est cependant une aberration : en effet, ce sont les transports par route des marchandises et des personnes qui ont les consommations d'énergie les plus élevées. Au sein de ce mode de transport énergétivore, le choix des transports individuels constitue une seconde aberration : on considère que les transports collectifs (en voyageurs/km ou tonnes/km) sont 2 à 3 fois plus performants en consommation énergétique que les transports individuels. (2)

Ce n'est donc pas l'efficacité énergétique qui a orienté les choix de modes de transports mais plutôt le rendement économique.

L'augmentation du nombre de véhicules à moteur se traduit par l'augmentation des oxydes d'azote, de monoxyde et de dioxyde de carbone. Le secteur des transports est ainsi un secteur d'activité qui contribue fortement à l'augmentation des rejets de gaz à "effet de serre". (3) L'évolution des modes de transports est donc en rupture totale avec le respect des équilibres de la biosphère.

(1) *Pour la science*, L'énergie, nov. 1990, p.68.

(2) Commissariat général du plan, "Energie: prospective technologique", *Problèmes économiques*, n°2250, 20.11.91., p.7, extraits du rapport du groupe technique "Prospective technologique" publié en août 1991.

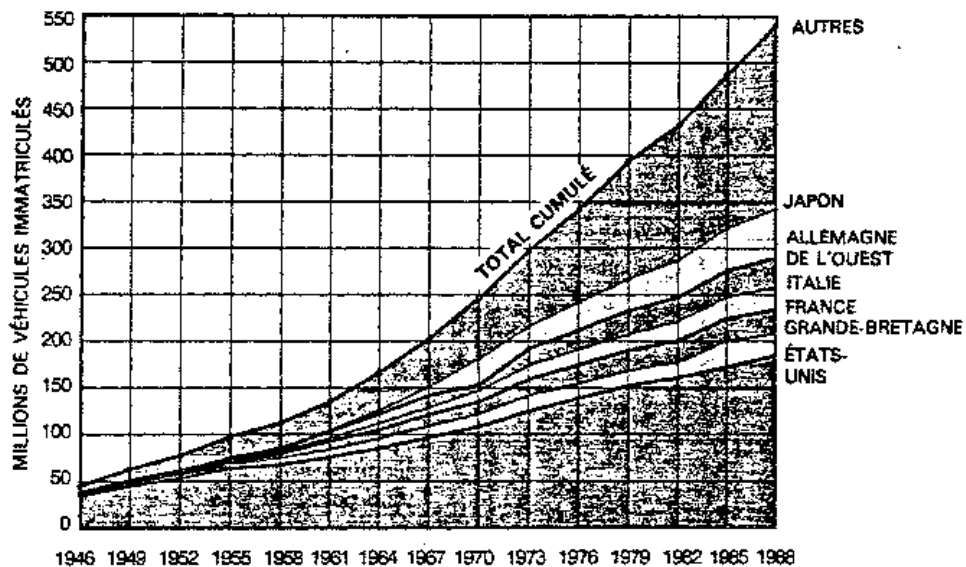
(3) S. FAUCHEUX, J-F NOEL, *Les menaces globales sur l'environnement*, La découverte, 1990, p.68.

EVOLUTION DES MODES DE TRANSPORTS EN FRANCE

en Mtep	1973	1986	en %
Transports routiers	22,40	30,60	+ 37
Transports maritimes et fluviaux	5,90	3,20	- 46
Transports ferroviaires et urbains	2,20	2,00	- 9
Transports aériens	1,90	2,80	+ 47
Consommation totale	32,40	38,60	+ 20

Source : AFME

La part des différents modes de transports a un pouvoir explicatif non négligeable sur les consommations énergétiques d'un pays et sur les effets négatifs attachés à cette consommation.



6. LE NOMBRE DE VÉHICULES en circulation dans le monde a été multiplié par 12 depuis 1945 ; parallèlement la consommation d'essence et la pollution atmosphérique ont considérablement augmenté. Le parc automobile a surtout progressé dans les pays industrialisés, mais à l'avenir, il s'accroîtra essentiellement dans les pays d'Europe de l'Est et dans les pays en développement.

Si les transports maritimes et fluviaux et les transports ferroviaires et urbains ainsi que les transports aériens ne consomment que peu ou pas de produits pétroliers, ce sont les transports routiers qui en consomment la quasi-totalité. Dans ces conditions, on peut s'interroger sur l'étendue des possibilités de substitutions existantes. S'il est possible d'ores et déjà d'améliorer la qualité des carburants d'origine pétrolière (exemple de l'essence sans plomb) ou encore d'élever les rendements des moteurs (amélioration de l'efficacité énergétique avec réduction de la consommation de carburant), il apparaît que cela demeure insuffisant à long terme : ces deux possibilités ne permettent pas d'éliminer les émissions de CO₂ et NO_x.

Afin de palier à ces inconvénients, le recours aux ressources renouvelables offre une solution à long terme beaucoup plus satisfaisante.(1) Il s'agit alors de préciser sur quel potentiel technologique des carburants de substitution peuvent remplacer les carburants d'origine pétrolière (essence et gas oil). Parmi les ressources renouvelables susceptibles de fournir une réponse à ce problème, il existe différentes filières de valorisation de la biomasse à des fins de carburants qui ont fait l'objet de nombreuses recherches.

La biomasse après diverses transformations peut produire des combustibles liquides destinés à l'alimentation de véhicules à moteurs essence et diesel. Depuis plusieurs années, la conversion de la biomasse en éthanol s'opère à grande échelle dans deux pays (USA et Brésil) principalement (2). Au Brésil, le produit de départ est constitué par la canne à sucre. Aux USA, c'est principalement le maïs qui est utilisé.

Cependant, il est possible d'obtenir de l'éthanol par fermentation alcoolique des sucres d'autres substances telle que la pomme de terre, la betterave à sucre ou le sorgho (3). Une production de méthanol à partir du bois est également possible mais est plus délicate à engager car elle repose sur la gazéification du bois, procédé au stade encore d'améliorations. Ainsi, l'obtention de méthanol à partir de substrats fossiles (charbon ou gaz naturel) apparaît plus performante (4).

Enfin, il y existe la filière MBE (mélange-Buthanol-Acétone-Ethanol) qui est basée sur les

(1) P. CHARTIER, "La biomasse : des chocs pétroliers à l'effet de serre", *Futuribles*, octobre 1991, p.37-62.

(2) OCDE/AIE, *Sources d'énergie renouvelables*, 1987, p.255.

(3) C.JANET, A. REYNAUD, opus cité, p.121.

(4) P. LEPRINCE et al., "Comment calculer le contenu énergétique des produits d'origine pétrolière et leurs substituts d'origine charbonnière ou végétale, applications au carburant", *Revue d'économie industrielle*, n°18, 4ième trimestre 1981, p.124-132.

résidus riches en matières cellulosiques (paille de blé, tiges de maïs), en amidon (blé) ou en sucres (betterave). L'utilisation en tant qu'additifs à l'essence d'un de ces alcools a pour effet de réduire les pollutions générées dans l'atmosphère. Dans ce cas, il n'est pas utile de modifier les moteurs. Ainsi, l'éthanol peut-il être ajouté à l'essence dans une proportion allant jusqu'à 15 % du total. Son utilisation de plus implique la suppression du plomb dans le mélange. Ces différents alcools constituent donc des substituts directs à l'essence. Une substitution totale (cas du Brésil) ou partielle est désormais possible.

Il existe également une valorisation de la biomasse qui permet d'obtenir un substitut au gas oil. Il s'agit de la transformation chimique par divers procédés des huiles végétales (colza, tournesol, palme) en esters méthyliques ou éthyliques dont la caractéristique essentielle est d'être dotée de propriétés comparables à celles du gas oil. Un procédé de transestérification est opéré en présence d'un catalyseur approprié soit à l'aide du méthanol soit à l'aide de l'éthanol (1). Cette voie fait l'objet d'expériences nombreuses, expériences pilotes -c'est le cas de l'unité de production installée à Compiègne en France dont l'activité est la transformation de l'huile de colza en esters- ou expériences de démonstration qui démontrent l'intérêt de ces nouveaux carburants de substitution.

Par ailleurs, compte tenu de la progression très forte du nombre de véhicules diesel, développer des cultures énergétiques afin de permettre une production d'esters apparaît une perspective à moyen terme. Entre 1970 et 1988, l'augmentation de la consommation de diesel a été de 190 % contre 38 % pour celle d'essence (2). Dans ces conditions, le champ de substituabilité apparaît très étendu.

Le point commun à ces combustibles est leur action bénéfique sur l'environnement en réduisant les rejets de NOX et de CO ainsi que d'hydrocarbures (3). Leur contribution dans les décennies à venir devrait de plus être envisagée comme une réponse "soutenable" dans le cadre d'une forte progression démographique des pays en développement. En 2025, 60 % de la population mondiale sera une population urbaine : d'immenses mégapoles vont ainsi se constituer et principalement dans des pays en développement. C'est dans ces pays que l'avancée des villes est la plus préoccupante (plus de 80 % en 40 ans) (4).

(1) S. FERRARI, *Etude technico-économique d'un procédé d'estérification des huiles végétales avec éthanol ou méthanol destiné à produire un carburant pour moteur diesel*, Rapport pour l'ANVAR, projet APIES, avril 1989.

(2) OCDE, *L'état de l'environnement*, 1991, p.231.

(3) OCDE/AIE, *Sources d'énergie renouvelables*, 1987, p.256.

(4) A. PARANT, "Les perspectives démographiques mondiales", *Futuribles*, mars 1990, p.76-77.

Compte tenu de l'urbanisation croissante du monde, le développement des moyens de transports devrait se poursuivre et avec lui son cortège de polluants. Si aujourd'hui le parc automobile est surtout localisé dans les pays industrialisés (78 % dans les pays de l'OCDE), demain, il s'étendra aux pays en développement.

A l'heure actuelle, il y a 500 millions d'automobiles dans le monde. On estime que si l'évolution se poursuit au même rythme, en 2025, il y en aura 4 fois plus ! (1).

L'emploi de la biomasse à des fins de carburant constitue donc une voie alternative qui, dans ce contexte peut contribuer activement à la réduction des émissions polluantes générées par les transports urbains. C'est finalement une constante dans la substitution énergies renouvelables-énergies non renouvelables.

La substitution de la base renouvelable à la base non renouvelable non seulement permet de satisfaire de nombreux usages en préservant les ressources de basse entropie sous forme des stocks, mais aussi permet de réduire les rejets issus directement de la production et de l'utilisation des sources fossiles (CO₂, NOX et SO₂).

La détermination du gisement potentiel de maîtrise énergétique peut être finalement précisée pour l'ensemble des usages énergétiques (voir schéma page suivante). Elle englobe l'ensemble des champs de substituabilité définis jusqu'ici, chacun d'eux s'appuyant sur un potentiel technologique bien déterminé.

Le point central de ce gisement réside dans le remplacement systématique de ressources fossiles par des ressources renouvelables dès lors que le potentiel technologique existe et que les usages sont repérés. Il s'appuie aussi sur une plus grande conservation de l'énergie et de la matière, conservation qui repose d'une part sur la récupération des déchets et le recyclage des matériaux, et d'autre part sur la recherche d'une plus grande efficacité des conversions énergétiques.

L'efficacité des conversions se mesure de la transformation de l'énergie primaire jusqu'à l'utilisation par le consommateur d'une énergie au stade ultime : le stade utile. L'énergie utile correspond à l'énergie effectivement utilisée. C'est l'énergie qui permet de satisfaire un service énergétique particulier. Conformément aux lois de la thermodynamique, tout au long de la chaîne de transformation, il existe des pertes physiques qui traduisent la dégradation irréversible de la base de basse entropie. J.M MARTIN considère ainsi que le rendement global du système énergétique mondial en 1987 est de 39 % (2). Dans le long ter-

(1) *Pour la science*, Gérer la planète, novembre 1989, n°145, p.77.

(2) J-M MARTIN, opus cité, p.12. Ce rendement est déterminé par le rapport suivant : consommation utile/consommation primaire.

me, compte tenu du rôle du progrès technique, le rendement devrait augmenter encore.

Pour B. LAPONCHE (1), il faut développer une approche globale de la politique de l'énergie en intégrant le système de consommation et donc assurer dans de bonnes conditions la maîtrise des consommations d'énergie. La notion d'énergie utile apparaît d'autant plus importante qu'elle diffère selon la nature des besoins et des usages. Ce point permet ainsi de souligner la distance grande qui sépare les pays industrialisés des pays en développement. L'efficacité énergétique des systèmes de consommation est souvent très faible dans les pays en développement où l'utilisation des ressources traditionnelles est essentielle (principalement le bois). Les équipements utilisés pour les usages domestiques sont très inefficaces et consomment de grandes quantités de bois, ressource dont la disponibilité décroît.

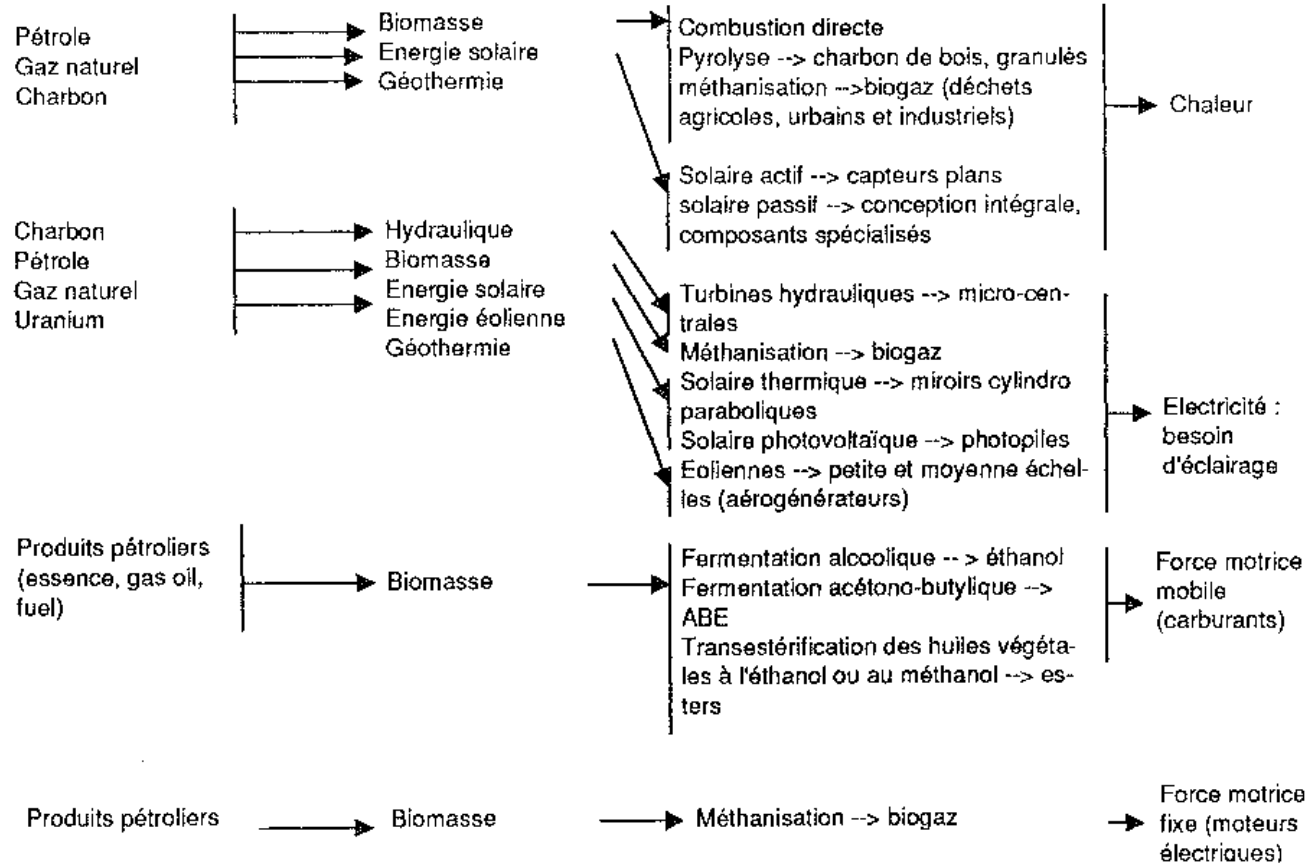
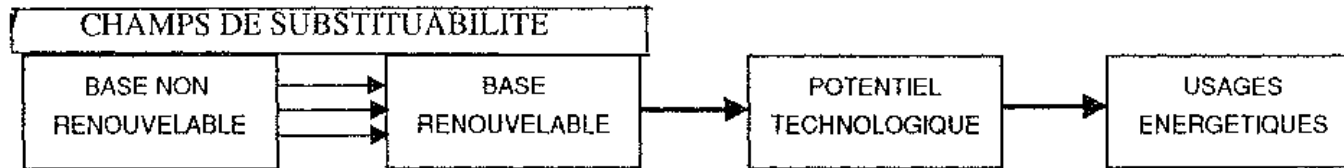
Dans ces conditions, il est fondamental de rechercher une meilleure solution pour la satisfaction d'un service tel que la cuisson des aliments par exemple. Pour y parvenir deux voies sont possibles : la première consiste à proposer des équipements plus performants et donc de réduire les consommations énergétiques.

Cependant, dans le cas des pays en développement, cette proposition demeure inadaptée à la situation relative à la ressource bois sauf à développer et gérer la sylviculture (reboisement, choix de modes de production ...). La seconde voie est la voie de rupture au niveau de l'usage lui-même. Cela signifie l'abandon de la ressource "bois" et la substitution d'autres ressources telle que le biogaz. Dans ce cas, il est nécessaire d'adapter de nouveaux équipements, dont les rendements sont plus élevés que les précédents. La satisfaction du besoin de cuisson sera alors meilleure.

Le gisement potentiel de maîtrise énergétique intègre cette problématique dans la mesure où il prend en compte la variabilité des champs de substituabilité selon les pays. Ces champs de substituabilité peuvent intervenir dans la limite des technologies disponibles à moment donné. Nous n'avons volontairement retenus que celles qui ont fait l'objet d'une commercialisation et qui compte tenu de la contrainte biosphère, sont des technologies susceptibles d'être largement diffusées.

(1) B. LAPONCHE, "Une conception globale de la politique de maîtrise de l'énergie", *Revue de l'énergie*, n°404, juillet-août 1988, p.491-497.

GISEMENT POTENTIEL DE MAITRISE ENERGETIQUE



Cependant, le potentiel technologique évolue dans le temps et d'autres technologies pourront être disponibles dans les années à venir. D'ores et déjà, un constat s'impose : c'est la sous-utilisation du potentiel disponible et donc la faible diffusion des technologies dans l'économie. La conséquence est l'étroitesse des champs de substituabilité et parfois leur absence totale alors que le potentiel technologique a été défini. L'objet du paragraphe suivant sera donc d'expliquer cela, d'étudier les moyens favorisant la diffusion du potentiel technologique afin d'exploiter pleinement le gisement potentiel de maîtrise énergétique.

§ 2 - De la sous-utilisation du potentiel technologique disponible vers une plus large diffusion des technologies

Le système énergétique actuel se caractérise par un faible rendement global, rendement qui, exprimé en terme d'efficacité exergétique, traduit son aptitude à transformer l'énergie primaire en énergie utile (en 1987, J.M MARTIN l'évalue à 39 %) (1). L'évaluation du gisement potentiel de maîtrise énergétique exprime les possibilités présentes non encore pleinement exploitées qui permettraient dans le cadre d'une mise en oeuvre à venir d'élever l'efficacité du système énergétique. Il existe un très grand nombre de champ de substitua- bilité mais le potentiel technologique est partiellement exploité pour la satisfaction d'usages sur des marchés très localisés. De ce fait, on observe une faible diffusion des technologies des énergies renouvelables ainsi que des technologies "propres".

Dans ces conditions, nous allons dans un premier temps comprendre pourquoi le potentiel technologique disponible est peu diffusé dans l'économie, quels ont les facteurs explicatifs de ce constat général. Nous pourrons alors dans un second temps proposer des moyens d'action appropriés afin d'utiliser efficacement ce potentiel et de contribuer à une plus grande efficacité du système énergétique. Considérons tout d'abord les innovations de substitution ou technologies des énergies renouvelables.

Une caractéristique essentielle de ces technologies est qu'elles présentent souvent des coûts initiaux élevés tandis que les frais d'exploitation sont plus faibles. La forte intensité en capital par rapport aux systèmes classiques est un premier facteur important qui a entravé la forte pénétration du marché des technologies ayant fait l'objet d'une commercialisation. Dans la plupart des pays de l'OCDE, la fourniture d'énergie à partir de sources d'énergie renouvelables est le fait soit de compagnies de services publics soit d'entreprises privées pour leur propre approvisionnement. Dans les deux cas, cette production constitue une activité secondaire. C'est notamment le cas pour l'électricité.

Au sein des entreprises privées, dans la mesure où les ressources financières sont limitées, on observe qu'en priorité elles seront affectées aux investissements relatifs à l'activité principale pour lesquels le taux de rendement retenu sera plus bas que celui admis dans le cas de sources d'énergie renouvelables.

(1) Se reporter au paragraphe précédent.

De ce fait, les technologies à forte proportion de capital et à faible coûts d'exploitation sont pénalisées. Le taux d'actualisation du secteur privé sera dans la pratique supérieur au taux du secteur public : le secteur public aura le même taux qu'il s'agisse d'investissements relatifs à l'actualité principale ou à l'activité secondaire. Par contre, l'entreprise privée accepte un taux de rendement plus bas pour l'activité principale que pour l'activité secondaire.

Il peut alors apparaître que le développement des techniques des énergies renouvelables soit plus avantageux pour le secteur public que pour le secteur privé (1). Dans ces conditions, la diffusion de ces technologies est entravée par un financement insuffisant du fait des risques financiers associés à ces technologies nouvelles et peu répandues.

Des préoccupations de coûts élevés et de risques associés à la nouveauté sont aussi des entraves à une large diffusion des technologies "propres" (2). Ainsi, au lieu de procéder à un changement de processus de production en introduisant une technologie propre, on préfère investir dans des équipements plus classiques pour traiter les émissions, les rejets et ainsi réduire la pollution. Cet investissement s'avère en général moins coûteux puisque l'appareil productif demeure dans sa structure inchangé. De plus, il n'est pas risqué. Les auteurs citent d'autres obstacles à leur diffusion avec notamment l'insuffisante diffusion de l'information technique, la rareté du "capital risque", les obstacles réglementaires et la faible reproductivité de ces techniques.

Concernant la diffusion des technologies des énergies renouvelables, les facteurs d'entrave institutionnels sont principalement : l'absence ou l'insuffisance d'informations sur les ressources disponibles localement et l'absence d'une infrastructure spécialisée dans les énergies renouvelables (pour la production d'équipements nécessaires aux différents stades de la mise en oeuvre des technologies (prospection, production, transformation, distribution ou encore transport des ressources énergétiques).

Le développement d'une telle infrastructure analogue à celle qui existe déjà pour les ressources fossiles peut contribuer fortement à une pénétration importante du marché. Enfin, compte tenu de la spécificité des ressources renouvelables, un autre facteur qui contribue à la limitation de la diffusion est celui de la localisation géographique. La disponibilité des sources d'énergie renouvelables est déterminée par le lieu géographique. Or, du fait d'une évaluation insuffisante de ces sites, les applications techniques demeurent limitées.

(1) OCDE/AIE, *Sources d'énergie renouvelables*, 1987, p.51.

(2) J-P BARDE, P-F TENIERE-BUCHOT, "Les technologies propres : illusions et réalités", *Futuribles*, novembre 1988, p.54-55.

C'est le cas pour la production d'électricité à partir des réservoirs géothermiques par exemple ou à partir de l'énergie éolienne. L'ensemble de ces facteurs limitent ainsi une large diffusion du potentiel technologique disponible. Cependant, sur quelques marchés, les technologies des énergies renouvelables sont aujourd'hui présentes.

D'après l'étude réalisée par B. DESSUS, le marché mondial des énergies renouvelables s'élevait à près de 200 milliards de francs en 1988 (1). Parmi les marchés les plus importants, figurent par ordre décroissant : la petite hydraulique (3/4 du marché), les chaudières et poêles à bois, la géothermie haute température, les capteurs solaires (solaire actif), le photovoltaïque, l'éolien, l'électricité thermique solaire. Parmi ces marchés, trois sont en forte croissance : 20 % par an pour le photovoltaïque, 15 % pour la petite hydraulique, 9 % pour la géothermie.

Le potentiel technologique disponible se diffuse inégalement selon les pays en fonction des besoins spécifiques à satisfaire et en fonction de la disponibilité des ressources. Ainsi, une forme décentralisée de ces énergies telle que le photovoltaïque pour la production d'électricité hors réseau est adaptée aux pays en développement pour lesquels un choix centralisé (construction d'un réseau électrique) impliquent de trop lourds investissements et des coûts d'exploitation élevés. Par ailleurs, le choix d'un mode de distribution en réseau n'est pas approprié dans des pays en développement où la population rurale est importante. Compte tenu de coûts de raccordements au réseau élevés et à une utilisation surtout domestique de l'électricité, ce mode de distribution est sous-optimal (2).

Par contre dans un pays industrialisé, la production d'électricité hors réseau satisfait à des besoins "de pointe", ponctuels. C'est le cas aux USA où la société Luz Solar en Californie a installé des centrales solaires à miroirs paraboliques qui alimentent en électricité de pointe des climatiseurs.

L'ensemble des technologies relatives aux énergies renouvelables n'est pas homogène du point de vue de la rentabilité économique. Un grand nombre sont viables économiquement et peuvent concurrencer directement sur certains marchés, les technologies classiques utilisant les ressources fossiles. Une faible proportion disponible sur quelques marchés demeure non concurrentielle aujourd'hui, sauf à bénéficier d'un traitement préférentiel.

(1) B. DESSUS, "Energie-développement-environnement, un enjeu planétaire au 21ème siècle", *Revue de l'énergie*, novembre 1989, n°145, p.978-992.

(2) A. LIEBARD et al., *Du neuf sous le soleil, énergie et environnement*, Calmann-Lévy/Systèmes solaires, 1991, p.117-135.

Viabilité économique des technologies disponibles

Sources d'énergie	Technologie viable sans aide	Technologie viable avec aide (pays de l'AIE)
Energie solaire	<ul style="list-style-type: none"> - photovoltaïque (applications éloignées, non reliées à un réseau) - solaire actif (production eau chaude, chauffage, chaleur industrielle) - solaire passif (chauffage locaux, climatisation) 	- conversion thermique de l'énergie solaire
Energie éolienne	- petite et moyenne dimension (≤ 500 kw)	- grande taille (> 500 kw)
Biomasse	<ul style="list-style-type: none"> - combustion directe (ordures ménagères, déchets industriels et agricoles) - digestion anaérobie (biogaz) 	- éthanol (à partir de substrats tels sucres et amidon)
Géothermie	- hydrothermique (utilisation de vapeur sèche et vapeur détendue)	- systèmes à cycle binaire
Energie marémotrice	- systèmes de conversion pour production d'électricité	

Source : d'après, *Sources d'énergie renouvelables*, op.cité

D'une manière générale, le potentiel technologique disponible peut pénétrer davantage le marché si il est possible d'abaisser les coûts des technologies. Deux voies d'amélioration de leur viabilité existent et sont envisageables pour différentes technologies : la production en plus grandes quantités et la réalisation d'économies d'échelle.

Voies d'amélioration de la viabilité économique

Production en série	Economies d'échelle
<ul style="list-style-type: none"> - systèmes solaires actifs de chauffage des locaux et de production d'eau chaude - systèmes de conversion de l'énergie éolienne à petite et moyenne échelles - petits systèmes photovoltaïques - conversion héliothermique de l'énergie solaire (miroirs cylindro-paraboliques) 	<ul style="list-style-type: none"> - technologies de l'énergie marémotrice - technologies de l'énergie géothermique - technologies d'exploitation de la biomasse (pour la production d'éthanol) - conversion héliothermique de l'énergie solaire

D'une technologie à l'autre les améliorations en matière de coût sont variables.

Cependant, il est possible de faire passer le seuil de viabilité économique aux technologies et donc d'envisager une diffusion étendue si des moyens d'action efficaces sont mis en oeuvre par la puissance publique. Le rôle de l'acteur public qu'est l'Etat dans l'accélération de l'intégration du progrès technologique dans la société est fondamental (1). Il peut intervenir en amont de la technologie-niveau fondamental - recherche et développement- et en aval - niveau du marché - ainsi que tout le long du processus de création de la technologie.

Nous allons donc préciser l'importance de l'acteur public et de ses interventions non seulement du point de vue de la diffusion des technologies mais aussi de leur émergence. L'intervention publique aux stades recherche-développement (RD) et démonstration (D) est essentielle dans le domaine des technologies des énergies renouvelables.

La phase démonstration, en aval de la RD, permet de rassembler les données concernant la viabilité technico-économique et d'envisager au moindre risque un passage à l'exploita-

(1) Commissariat général du plan, La diffusion des innovations technologiques, Etudes et recherches, juillet 1985, La documentation française, p.11.

tion industrielle et commerciale de la technologie. C'est donc une étape très importante pour la diffusion des technologies. Cette étape se situe en amont de la phase d'investissement et se différencie d'elle par un risque inhérent au projet très élevé.

Schématiquement, on a :



Dans l'ensemble des pays industriels et notamment les pays de l'AIE, les gouvernements ont joué un rôle décisif dans le développement des technologies des énergies renouvelables en intervenant au niveau des activités de RD et D. Cette situation s'explique par le fait que les industries ne pouvaient entreprendre des travaux de recherche et développement compte tenu de deux facteurs prépondérants : les délais nécessaires pour mener de telles activités de recherche, et le poids des investissements en capital à réaliser pour démontrer la viabilité économique des technologies.

Entre 1973 et 1980, les budgets totaux consacrés aux activités de recherche et développement et démonstration relatifs aux énergies renouvelables ont fortement progressé. Ces activités ont permis la mise en oeuvre de programmes de recherche avec la mise au point, la démonstration de composants et des systèmes.

A la fin des années 1980, grâce aux résultats de RD et D obtenus et à l'expérience acquise qui s'est traduite par le passage des techniques de la phase démonstration au stade commercial, des choix plus ciblés sur des projets porteurs ont pu être effectués en fonction des situations nationales et de l'affectation des ressources. Après 1980, les restrictions budgétaires affectent les dotations aux technologies des énergies renouvelables. Cependant, les dépenses allouées à ces technologies pour les activités de RD et D demeurent relativement importantes : en 1985, elles correspondent à 8 % des budgets globaux des pays de l'AIE. Il existe de fortes disparités entre les pays sur les priorités accordées en matière de RD et D.

Le tableau ci-dessous exprime la diversité des situations.

VENTILATION DES PRINCIPALES ACTIVITES DE RD&D FINANCEES PAR LE SECTEUR PUBLIC EN 1985
ACTIVITES DE RD&D SUR LES ENERGIES RENOUVELABLES EN DOLLARS DES ETATS-UNIS DE 1985
 (Millions)

	Cchauffage solaire	Energie photo- électrique solaire	Energie thermo- électrique solaire	Energie éolienne	Energie des mers	Biomasse	Energie géothermique	Total	% du budget national
Allemagne	7.64	18.10	6.11	8.52	0	0.20	4.28	42.85	7.81
Canada	5.93	3.29	0	4.54	0.22	9.08	0.44	23.50	6.24
Espagne ^{1,2}	0	23.52	0	11.47	0.06	3.00	1.18	39.22	26.56
Etats-Unis	12.90	56.90	35.80	29.50	4.70	49.70	30.80	220.30	9.76
Italie	4.59	6.04	0.06	3.77	0	2.23	0.30	17.00	2.99
Japon	2.49	35.19	0.83	1.25	1.43	7.69	21.62	70.51	4.53
Pays-Bas ¹	0	4.18	0	22.06	0	2.71	4.21	33.16	28.99
Suède	4.37	0.51	0.07	1.86	0.12	11.87	0.46	19.26	23.40
Royaume-Uni	1.15	0	0.13	8.47	0.51	0.64	4.75	15.66	4.30
Total AIE	39.07	147.73	43.00	89.44	7.04	87.12	68.04	481.46	

1. Les chiffres concernant les Pays-Bas et l'Espagne correspondent à l'ensemble des groupes chauffage solaire, énergie photoélectrique solaire et énergie thermoélectrique solaire.

2. Données tirées des communications faites en 1984.

Source : *Politiques et programmes énergétiques des pays Membres de l'AIE. Examen 1985*. OCDE, Paris, 1986.

L'ensemble des pays conservent des programmes minimaux dans la plupart des domaines technologiques afin de suivre les innovations qui y interviennent. Il existe aussi un intérêt particulier pour une ou deux technologies afin d'atteindre une position dominante dans des domaines précis : c'est le cas du Canada par exemple qui met l'accent sur la biomasse et le chauffage solaire ou encore des Pays-Bas et du Danemark qui s'intéressent particulièrement à l'énergie éolienne. Seule exception : les Etats-Unis mènent des activités dans tous les domaines.

Les dépenses de RD sont nécessaires pour permettre des perfectionnements technologiques de technologies déjà commercialisées et accroître ainsi leur compétitivité. Deux domaines à cet égard sont importants : l'évaluation des ressources (énergie éolienne, géothermie) et la configuration des systèmes (éolien, biomasse, photovoltaïque). Les pays de l'AIE poursuivent aussi des recherches afin d'améliorer le rendement des capteurs (durée de vie et fiabilité), la fiabilité des matériaux et des composants dans les systèmes solaires passifs et actifs.

A côté de ces interventions, nous pouvons prendre en compte le rôle majeur de la Com-

mission des Communautés Européennes pour favoriser les technologies des énergies renouvelables dans le cadre de nombreux financements de travaux de recherche, de développement et de démonstration.

Dès 1978, un programme communautaire de démonstration "énergie" a été mis en oeuvre afin de promouvoir les nouvelles technologies énergétiques dans 4 domaines essentiels : les sources énergétiques alternatives (c'est-à-dire renouvelables), les économies d'énergie, la substitution des hydrocarbures, et la liquéfaction et gazéification des combustibles solides. La procédure est celle de l'appel d'offres. La communauté, en prenant en charge une partie des risques liés à la démonstration, intervient entre les phases amont (recherche, prototype...) et la commercialisation. Entre 1978 et 1985, 544 millions d'écus ont été alloués aux projets de démonstration et aux projets pilotes retenus (soit 993 projets au total). Plus de 70 % du crédit a concerné les énergies renouvelables, les économies d'énergie et la substitution des hydrocarbures. (1)

Plus récemment, en 1989, le programme JOULE (Joint Opportunities for Unconventional or Longterm Energy Supply) a été lancé. Il s'étend sur une période de 3 ans (1989-1992).

C'est un programme de recherche et développement technologique dans le domaine des énergies non nucléaires et de l'utilisation rationnelle de l'énergie. (2) Les crédits affectés à cette action s'élèvent à 122 millions d'écus. Les recherches consacrées aux énergies renouvelables s'élèvent à 47 millions d'écus, soit près de 40% du total. Les énergies renouvelables concernées sont : l'énergie éolienne, le solaire (photovoltaïque), l'énergie hydraulique, la biomasse, l'énergie géothermique et la géologie profonde.

Aux côtés des actions en amont, le rôle des acteurs publics est aussi un élément clé de la diffusion de la technologie grâce à l'emploi d'instruments réglementaires et économiques.

En général les technologies sont commercialisées - et ont donc déjà pénétrées les marchés - mais l'intervention publique permet d'améliorer leur compétitivité et donc de faire en sorte qu'elles puissent concurrencer les technologies utilisant une base fossile. C'est le cas notamment des applications de l'énergie éolienne à grande échelle, de la production d'éthanol à partir de la biomasse (voir tableau précédent) où une aide est versée.

Dans le cadre de l'optimisation du potentiel technologique disponible, nous allons préciser quels sont les moyens qui peuvent être appliqués afin de favoriser les technologies des énergies renouvelables. Le versement d'une aide permet de faire passer la technologie de

(1) Communautés Européennes, L'Europe et les nouvelles technologies, Comité économique et social, 1988, p.51-52.

(2) Commission des Communautés Européennes, L'Europe de la technologie, 10-89, p.3-4. Décembre 1988.

l'étape RiD à celle de son introduction sur le marché. Cela a été le cas des petits systèmes de conversion de l'énergie éolienne, systèmes qui aujourd'hui sont viables économiquement.

L'intervention de l'Etat autorise une accélération de l'évolution de la technologie et donc sa maturité. On distingue deux types de mesures permettant d'accroître la compétitivité et favorisant la pénétration des marchés : des mesures juridiques et des mesures économiques.

Les premières sont encore peu développées. L'adoption de règlements visant à protéger les droits de l'ensoleillement ou à encourager l'utilisation de l'énergie éolienne sont des mesures qui sont déjà appliquées dans de nombreux états d'Amérique. Une législation sur l'accès au soleil est en cours en Australie.

Ce sont principalement les mesures économiques qui sont employées. Il s'agit soit d'incitations fiscales avec l'exonération d'impôts spécifiques, l'amortissement accéléré ou encore les déductions d'impôts, soit d'incitations financières avec le versement de subventions, les prêts à faible taux d'intérêt, les garanties de prêts. (1) Dans la plupart des pays de l'OCDE, les mesures d'incitations économiques ont permis et permettent encore la percée d'industries spécialisées dans les technologies des énergies renouvelables, percée qui aurait eu lieu beaucoup plus tard en l'absence de toute participation publique.

Les modalités d'une intervention publique de l'amont vers l'aval en passant par tous les stades intermédiaires constitue finalement une véritable stratégie en matière d'innovation, stratégie essentielle dans le domaine des énergies renouvelables. Pour illustrer ce propos, nous proposons d'étudier le rôle de l'AFME (Agence Française pour la Maîtrise de l'Energie) dans le cadre de ses interventions au niveau des sources d'énergie renouvelables. Il convient cependant de noter que l'agence intervient aussi dans le domaine de la maîtrise de l'énergie et plus précisément dans l'utilisation rationnelle de l'énergie. Cette agence aujourd'hui n'existe plus en tant que telle. En effet, elle a été regroupée avec L'AQA (agence pour la qualité de l'air) et l'ANRED (agence nationale de récupération et d'élimination des déchets) afin de constituer l'ADEME (agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie).

Cette action conduit à promouvoir la diffusion des technologies disponibles les plus efficaces et donc à exploiter le gisement d'économie d'énergie. (2) Comme la diffusion épuise

(1) OCDE/AIE, Sources d'énergie renouvelables, 1987, p.72-77.

(2) P. CHARTIER et al., "Le défi de l'effet de serre : l'efficacité énergétique est-elle une réponse ?", Energy technologies for reducing emissions of greenhouse gases", OCDE/AIE1989, vol.1, p.115-129.

progressivement ce gisement, une activité de recherche et de développement est menée afin de le renouveler et d'introduire de manière continue des technologies nouvelles plus efficaces que les précédentes.

Cependant les délais entre le résultat de la recherche - technologie disponible - et l'impact énergétique - sa diffusion - peuvent être longs. Dans le cas des projets de recherche sur les véhicules économes par exemple, l'agence estime que leurs effets en terme d'économie d'énergie ne seront observés qu'au delà de l'an 2000 alors que leur phase de recherche et développement s'est achevée en 1987. Il apparaît donc souhaitable pour l'agence de poursuivre les efforts de RID afin d'améliorer les technologies existantes et d'élargir le potentiel technologique disponible en favorisant l'émergence de nouvelles technologies. Ce point n'est d'ailleurs pas exclusif du domaine des économies d'énergie ; il va apparaître essentiel dans le domaine des énergies renouvelables que nous allons aborder maintenant.

L'agence intervient financièrement aux stades de la mise au point, de l'industrialisation et de la commercialisation des produits/procédés mettant en oeuvre les ressources renouvelables. Ses compétences s'exercent aussi bien dans le secteur de l'industrie, que dans celui des transports, de l'agriculture ou de l'habitat. Dans une récente étude, l'évaluation de la stratégie technologique est appréhendée à l'aide d'instruments d'analyse nouveaux -les réseaux technico-économiques- où s'articulent des relations spécifiques entre le pôle de la science, celui de la technique et celui du marché. (1) Cette approche s'appuie sur une thèse dynamique de l'innovation où l'innovation dépend de l'existence d'interactions entre ces 3 pôles.

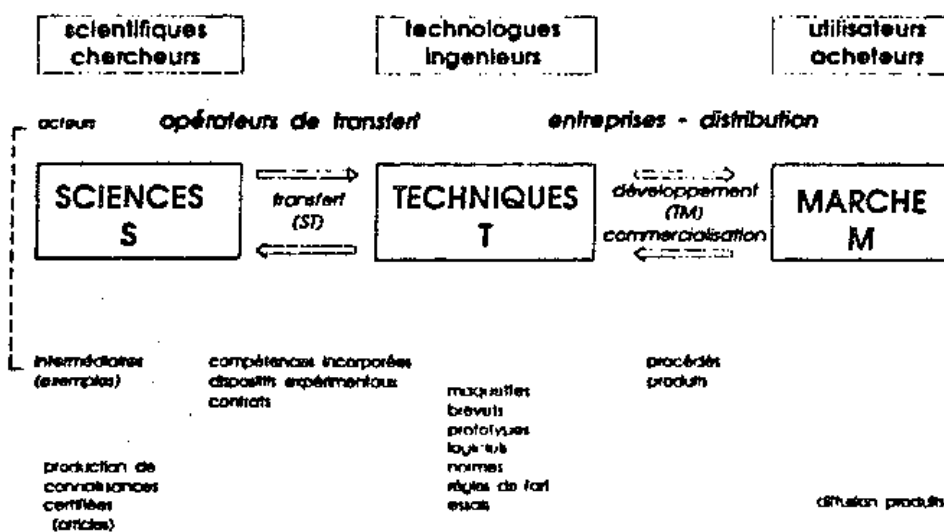
En premier lieu, une évaluation stratégique est effectuée afin de déterminer les produits stratégiques, produits porteurs qui vont contribuer à une meilleure maîtrise de l'énergie. Dans un second temps, une évaluation technico-économique intervient en précisant les domaines scientifiques ou technologiques qui permettront de contribuer à l'amélioration et à la diffusion des produits stratégiques, et en déterminant les modalités des interventions de l'agence. Cette évaluation porte sur les relations entre la recherche et le marché. Elle s'appuie sur le concept de réseau technico-économique défini comme "un ensemble coordonné d'acteurs hétérogènes".

(1) M. CALLON, P. LAREDO, RABEHARISOA, "Des instruments pour la gestion et l'évaluation des programmes technologiques : le cas de l'AFME", in DE BANDT et FORAY D., L'évaluation économique et la recherche et du changement technique, 1991, p.301-331.

Ces acteurs sont constitués par les scientifiques, les ingénieurs, les industriels, les usagers, les organismes financiers ainsi que les pouvoirs publics. Tous participent à l'élaboration et à la diffusion des innovations. De nombreux échanges existent entre eux, échanges qui s'organisent autour des 3 pôles : le pôle scientifique (production de connaissances), le pôle technique (brevets, pilotes, prototypes, normes...), et le pôle marché (produits commercialisés).

Des interactions se développent aussi au sein de 2 activités d'intermédiation : entre la ressource scientifique et la ressource technique (pôle transfert - ST) et entre la ressource technique et le marché (pôle développement - TM).

Le réseau technico-économique



L'analyse technico-économique consiste à dresser un état des réseaux en fonction de différentes caractéristiques. Un réseau est lacunaire si il existe des maillons manquants autrement dit un ou plusieurs sous-réseaux (S, ST, T, TM, M) sont absents. Un réseau est au contraire chaîné si tous les pôles existent. Chaque réseau peut être apprécié par son degré d'intégration. Deux situations extrêmes sont possibles. Le réseau est dit convergent si il existe de nombreuses interactions entre les acteurs. Un réseau très convergent est par conséquent chaîné. Un tel réseau sera à l'origine d'innovations prévisibles. Au contraire, si

le réseau est dispersé, les relations entre les acteurs sont de faible densité ; ce réseau génère des innovations imprévisibles.

Compte tenu de la caractéristique du réseau, l'intervention ou la non intervention de l'agence peut alors être précisée. Si le réseau est durablement chaîné et interactif (convergent), l'intervention publique est inutile et non justifiée. Par contre, si le réseau est lacunaire, l'objectif de l'intervention est de créer les maillons manquants. Cette action est une action de rupture dont le but est de faire apparaître des combinaisons nouvelles au niveau d'un des 5 pôles.

Si le réseau est dispersé, l'intervention de l'agence a pour but d'augmenter les interactions de manière à accroître son degré de convergence. L'action est de nature continue ; il s'agit de faire évoluer et interagir des activités déjà existantes. Rupture et continuité sont les 2 finalités de l'Agence qui met en oeuvre deux sortes d'interventions pour faire passer le réseau à un état souhaité : de structuration (dans le cadre de plusieurs acteurs) et ponctuelles (soutien d'un acteur particulier).

Au sein des actions que l'AFME doit engager selon l'état des réseaux, 4 situations typiques émergent :

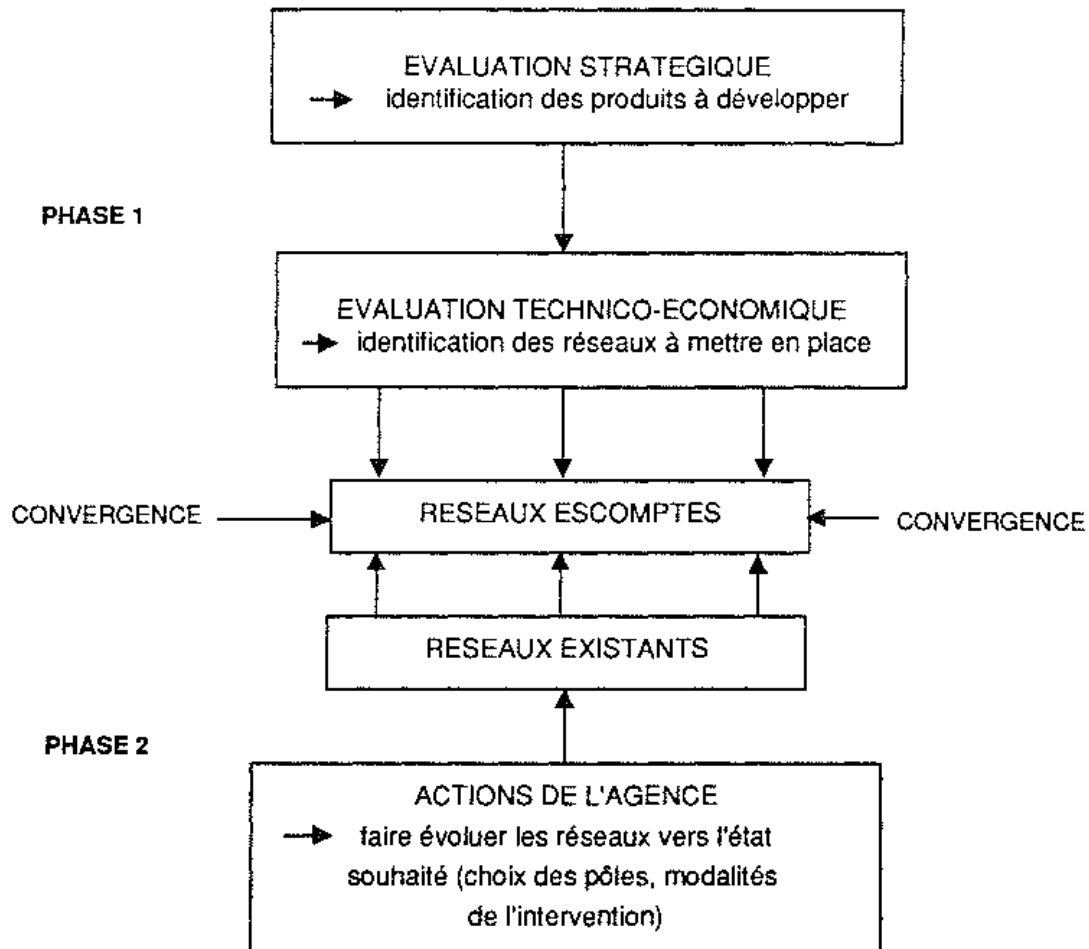
INTERVENTIONS DE L'AFME DANS LE DOMAINE DES ENERGIES RENOUVELABLES

Caractéristique du réseau	Localisation de l'intervention	Domaines technologiques
Réseau chaîné technologies mûres marchés existants	action sur T-M	- bois combustible - petites centrales hydroélectriques - incinération des ordures ménagères - solaire passif dans l'habitat
Réseau lacunaire technologies mûres marchés à créer	action M action sur t-M	- géothermie basse température - solaire basse température - éthanol carburant (ex.blé-betterave)
Réseau lacunaire technologies en développement et niches de marché	action sur S-T, T-M et M	- photovoltaïque - éolien - méthanisation
Réseau lacunaire ruptures scientifiques et technologiques	action sur S et T	- application thermodynamique de l'énergie solaire - gazéification du bois - géothermie haute température - hydrolyse du bois - biotechnologies solaires - nouvelles couches minces

L'intérêt d'une évaluation technico-économique est de repérer précisément l'ensemble des réseaux afin de concentrer l'effort financier là où il va être nécessaire. C'est donc un moyen efficace pour éviter le gaspillage de fonds publics. Le rôle de l'Agence est d'obtenir au moment opportun une convergence maximale des réseaux, convergence de réseaux conçus pour atteindre des objectifs fixés. De tels réseaux constituent les réseaux escomptés. C'est à partir de la description de tels réseaux à mettre en place que l'Agence identifie l'état du réseau actuel sur lequel elle doit intervenir pour le faire évoluer vers l'état souhaité. Cela suppose d'identifier, au fil d'une procédure d'essais et erreurs et au terme d'un long apprentissage, progressivement les différents niveaux considérés comme pertinents potentiellement du point de vue de la maîtrise de l'énergie. Cette identification des ré-

seaux dépend du point de départ choisi, c'est à dire du pôle ou des pôles retenus.

On peut résumer dans un schéma le déroulement de la procédure :



L'innovation et sa diffusion s'intègre dans un cadre dynamique où la constitution de réseaux exprime la coopération flexible d'acteurs hétérogènes multiples. Cependant, compte tenu du rôle stratégique des interventions financières publiques, le processus d'innovation peut être dans certains cas orienté sur une trajectoire prédéterminée.

Les travaux de W.B ARTHUR sur la compétition technologique démontrent comment de "petits évènements" historiques peuvent produire un effet de localisation du progrès technique sur une technologie particulière (1).

(1) W.B. ARTHUR, "Competing technologies, increasing returns, and lock-in by historical events", *The economic journal*, 99, March 1989, p.116-131.

Compte tenu des rendements croissants d'adoption, une décision étatique relative à un choix de technologie conduit à un blocage du processus d'adoption de toute autre technologie : effet de "lock-in" ou d'inflexibilité.

D. FORAY considère que l'Etat est un acteur qui exerce une influence très forte sur le processus de sélection des technologies par l'intermédiaire d'instruments économiques (taxes, subventions) notamment (1). L'efficacité de l'action publique est maximale au tout début du processus de sélection, c'est à dire lorsque peu d'informations sur les potentialités de développement des technologies sont disponibles. Il serait alors souhaitable que le choix fût retardé afin d'acquérir davantage d'informations sur les technologies en présence : "Les propriétés du processus de compétition (path-dépendent, inflexibilité) commandent d'agir afin d'empêcher l'apparition trop rapide d'une situation de "lock-in", prolonger la période d'incertitude et préserver ainsi sa capacité d'intervention, en attendant que l'information sur les avantages respectifs des deux technologies soit disponible". Il convient dès lors de soutenir l'ensemble des technologies en compétition et donc de garder le potentiel technologique largement ouvert. C'est là une stratégie de flexibilité sereine qui évite tout choix technologique prématuré dans un environnement où l'information est croissante.

Dans le domaine des technologies des énergies renouvelables, il existe souvent une concurrence entre deux voire plusieurs technologies et il apparaît impossible d'effectuer un choix rationnel, compte tenu des informations disponibles. L'exemple de l'énergie photovoltaïque est révélateur. Deux filières existent : la filière silicium polycristallin et la filière silicium amorphe. Actuellement, la filière polycristallin offre des rendements plus élevés que la filière amorphe.

Cependant, celle-ci a l'avantage d'avoir un coût plus faible. Il existe une compétition très forte entre les deux et le choix futur dépendra des progrès réalisés dans la pureté des matériaux, les technologies de fabrication des matériaux et les améliorations de rendement. Au stade de développement des 2 filières technologiques, aucun choix ne peut être formulé au risque de localiser le progrès technique sur une des 2 technologies et de créer une situation de "lock-in" qui est irréversible. L'irréversibilité tient à l'apprentissage, au "learning by using" associée à la technologie choisie. Plus l'apprentissage associé à son utilisation sera important et plus elle va devenir efficace. Dès lors, toutes les autres technologies en compétition avec elles ne seront jamais choisies. C'est le cas par exemple du choix étatique relatif au type de réacteur nucléaire aux USA à eau légère qui devient un standard

(1) D. FORAY, "Les modèles de compétition technologique, une revue de la littérature", Revue d'économie industrielle, n°48, 2ème trimestre 1989, p.26-27.

mondial. C'est aussi le cas en France du choix du "tout nucléaire" dans les années 1970, choix qui a induit l'arrêt des recherches sur les technologies du solaire. L'effort de R/D consacré au nucléaire va assurer l'hégémonie de cette énergie sur les énergies alternatives. (1)

Dans le domaine des énergies renouvelables, il est essentiel de conserver un vaste potentiel technologique et de poursuivre les efforts à long terme afin de l'améliorer et de l'enrichir. Le processus de diffusion est par nature dynamique et s'inscrit dans la durée. La continuité de l'activité inventive ainsi que l'importance des améliorations des innovations après leur introduction initiale sont donc essentielles. Le rôle de l'acteur public est de s'attacher à mettre en oeuvre les moyens nécessaires pour que le potentiel technologique puisse s'accumuler dans le temps et se diffuser dans toute l'économie. Le gisement potentiel de maîtrise énergétique n'est pas immuable. Il évolue sous l'effet du progrès technique et d'une diffusion plus large des technologies dans l'économie. La puissance publique peut jouer un rôle au niveau du processus de création de technologie et donc participer à l'accumulation du potentiel technologique. Elle peut aussi intervenir au niveau du processus de diffusion et donc permettre un meilleur emploi de ce potentiel technologique. Ce sont là deux champs d'action qui contribuent à exploiter le gisement potentiel de maîtrise énergétique et autorise une meilleure efficacité du système énergétique.

Une condition de flexibilité de ce système et donc d'une souplesse d'adaptation aux changements, réside dans l'étendue et la diversité du potentiel technologique. En effet, en présence d'incertitudes sur l'évolution future des éléments de la biosphère, il est primordial de disposer d'un grand nombre de réponses technologiques, réponses diversifiées (innovations d'économie et innovations de substitution) capables de faire évoluer le système énergétique vers un état, une structure différente de manière progressive. Un potentiel technologique affaibli augmente la rigidité du système et le rend plus vulnérable.

L'émergence d'un système énergétique soutenable est profondément liée à l'exploitation du gisement de maîtrise énergétique et donc repose sur un potentiel technologique suffisamment développé et diversifié.

(1) P. RADANNE, L. PUISEUX, *L'énergie dans l'économie*, Syros, 1984, p.78.

Conclusion du chapitre

L'émergence d'un système énergétique soutenable ne peut être "naturelle". Elle doit donc être favorisée par des actions précises destinées à renforcer principalement le potentiel technologique. Des actions relatives à l'apparition de technologies nouvelles et à leur diffusion, mais aussi des actions relatives à l'amélioration constante de leur efficacité énergétique du fait du progrès technique doivent orienter les choix technologiques et flexibiliser l'ensemble du système énergétique.

L'enrichissement continu du potentiel technologique constitue à long terme une priorité. Seule une base technologique suffisamment hétérogène peut en effet garantir une flexibilité d'adaptation.

CHAPITRE 8 : STRATEGIE DE MAITRISE DE L'EVOLUTION ENTROPIQUE

Introduction

Parmi les différents futurs énergétiques, seuls sont acceptables ceux dont la finalité est le développement soutenable des sociétés. Il existe ainsi plusieurs approches globales permettant, sur la base d'un potentiel technologique diversifié, d'accéder à une meilleure maîtrise de l'énergie à travers des modifications structurelles du système énergétique.

L'introduction de ressources abondantes de basse entropie accessible, qui apparaît comme une priorité majeure, doit nécessairement être stimulée alors que le recours aux ressources fossiles doit être découragé. Il y a là une grande place pour l'adoption de moyens efficaces favorisant une meilleure régulation de la biosphère au moyen d'une réaffectation des ressources dans les usages énergétiques et d'une utilisation exclusive des technologies à haut rendement énergétique.

L'émergence d'un système énergétique soutenable suppose par ailleurs que l'on s'intéresse aux modalités d'une transition flexible, apte à éviter l'échec d'une évolution vers un sentier unique dominé par l'irréversibilité des choix énergétiques. Une telle transition est difficile à maîtriser en raison de l'existence de perturbations aléatoires qui jouent un rôle essentiel dans l'évolution du système : c'est grâce à leur amplification que l'on peut s'acheminer vers un état stable final caractérisant un système énergétique soutenable. L'accumulation du savoir véhiculée par le gisement potentiel de maîtrise énergétique doit contribuer à orienter le système sur les sentiers d'évolution les moins irréversibles et assurer ainsi un ralentissement de l'entropie de la biosphère.

Parrallèlement, la naissance d'un système énergétique soutenable n'est pas possible en l'absence d'une révolution de la conscience humaine et de l'émergence d'un nouveau paradigme : le paradigme planétaire.

Section 1 - Changements structurels au sein du système énergétique : l'intégration des contraintes environnementales

§ 1 - Analyse des scénarios énergétiques futurs intégrant le "développement soutenable" : la convergence vers un nouveau système énergétique

Un grand nombre de scénarios énergétiques ont été construits depuis le second choc pétrolier afin de dessiner à un horizon plus ou moins éloigné les perspectives énergétiques mondiales. Cependant, ils sont peu nombreux à s'intégrer dans le cadre d'un "développement soutenable" et à aboutir à l'émergence d'un système énergétique nouveau qui exploiterait pleinement le gisement potentiel de maîtrise énergétique (1).

Parmi les travaux intégrant les facteurs économiques démographiques et techniques dans une problématique écologique, l'étude de GOLDEMBERG et al. constitue un point de départ intéressant. C'est la première étude qui s'inscrit véritablement, dans le cadre d'un développement des sociétés compatibles avec les équilibres de la biosphère (2). L'originalité de l'étude réside dans l'évaluation d'une stratégie énergétique globale qui met l'accent sur le côté utilisation finale de l'énergie plutôt que sur l'offre énergétique.

Cette approche en terme d'utilisation finale permet d'explorer l'évolution du système énergétique vers une voie compatible avec la réalisation d'une société soutenable. Elle indique qu'il est possible de conserver la consommation d'énergie globale actuelle au même niveau dans un proche futur (d'ici 2020). Le scénario énergétique est donc un scénario centré sur la maîtrise des consommations d'énergie.

La consommation d'énergie primaire s'établit à 11,2 Tw soit 7,8 Gtep dans le monde en 2020 ; soit une progression d'à peine 9 % par rapport au niveau de 1980, ce qui constitue une voie optimiste. A titre de comparaison, elle s'élève à 15,1 Gtep en 2020 dans le cadre de l'hypothèse centrale du scénario de la Conférence mondiale de l'énergie. Au sein des pays industrialisés, elle baisse fortement ce qui permet d'observer un doublement chez les pays en développement.

Les auteurs expliquent cette évolution grâce au progrès technique : dans les pays indus-

(1) Pour une comparaison de divers scénarios, voir : J. GOLDEMBERG et al. "An end-use oriented global energy strategy", *Annual review of energy*, vol.10, 1985, p.613-688.

(2) J. GOLDEMBERG et al., opus cité.

rialisés, l'intensité énergétique de la production est en baisse dans l'ensemble des secteurs d'activités. Cela traduit une meilleure efficacité énergétique des technologies.

L'évolution de la demande d'énergie tient compte de l'évolution technologique et aussi de la généralisation de procédés et équipements à haute efficacité énergétique.

Il en résulte que les besoins en plus grand nombre pourront être satisfaits en élevant très peu la consommation d'énergie primaire dans les pays en développement et en la diminuant fortement dans les pays industrialisés.

Grâce à l'élévation des rendements dans les usages énergétiques et à la diffusion des technologies les plus performantes, les pays en développement pourront satisfaire leurs besoins en s'éloignant du système énergétique issu du développement des pays industrialisés. Un nouveau système plus économe en capital peut émerger en s'appuyant sur des technologies améliorant l'efficacité énergétique au niveau de l'usage. Les besoins en investissement pour de telles technologies sont moins élevés que ceux qu'il faudrait engager pour l'élévation de l'offre d'énergie dans un équipement énergétique moins efficace (1). Des technologies énergétiques plus économes en énergie leur permettraient aussi d'assurer le développement en évitant de copier l'histoire énergétique inefficace des pays industrialisés.

Dans ces conditions, compte tenu du potentiel technologique disponible - le scénario ne dépend pas de percée technologique - une forte réduction de l'intensité énergétique de l'économie est possible dans l'ensemble des pays industrialisés. Sur la période 1980-2020, la consommation d'énergie finale par habitant pour ces pays est divisée par 2 : de 4,92 kw à 2,5 kw. Cela est possible grâce à l'adoption généralisée dans toute l'économie de technologies plus efficaces.

Concernant les pays en développement, la consommation d'énergie finale par tête s'élève très peu : de 0,87 à 1 kw. Ce niveau permet d'assurer la satisfaction des besoins humains grâce aux améliorations de l'efficacité énergétique engendrée par le remplacement des combustibles traditionnels (bois) par des combustibles plus efficaces (notamment le biogaz) ; d'où d'importantes économies d'énergie. De considérables économies peuvent être obtenues par l'adoption de technologies plus efficaces (2).

(1) J. GOLDEMBERG et al., opus cité, p.657.

(2) J. GOLDEMBERG et al., opus cité, p.664.

Scénario, demande globale d'énergie - J. GOLDEMBERG

	Pays industrialisés		Pays en développement		Monde	
	1980	2020	1980	2020	1980	2020
Population (milliard)	1,11	1,24	3,32	5,71	4,43	6,95
Consommation d'énergie primaire (Tw)	7,00	3,90	3,30	7,30	10,30	11,20
Consommation primaire par tête (kw)	6,30	3,15	0,99	1,28		1,61
Consommation d'énergie finale (Tw)	5,47	3,10	2,90	5,71	8,37	8,81
Consommation finale par tête (kw)	4,92	2,50	0,87	1,00	1,89	1,27

Le scénario proposé montre comment parvenir à un rééquilibrage des consommations énergétiques, rééquilibrage nécessaire pour assurer un développement soutenable. Pour y parvenir, la maîtrise des consommations énergétiques grâce au vecteur technologique est un facteur clé.

Par ailleurs, cette maîtrise permet aussi, pour les auteurs, d'assurer une plus grande flexibilité de l'offre en évitant une dépendance aigüe à l'égard de quelques ressources énergétiques, notamment le pétrole. En effet, une forte demande implique le choix d'un système peu diversifié où la prépondérance de une ou deux sources d'énergie (pétrole, combustibles fossiles en général) confère une forte rigidité au système. Dans ce cas, des besoins croissants conduisent à l'expansion de l'approvisionnement. Au contraire, si la demande est maîtrisée, l'offre énergétique peut être diversifiée et peut apporter une souplesse au système, donc une plus grande capacité de réponse face aux changements affectant la biosphère (accroissement du CO₂ atmosphérique notamment).

Ainsi, au niveau des différentes sources d'énergie, il est nécessaire de ralentir l'épuisement des combustibles fossiles et principalement le charbon et le pétrole. Cependant, ces 2 sources fossiles constituent encore près de 50 % de l'approvisionnement énergétique

Les parts de l'énergie nucléaire et de l'énergie hydraulique progressent entre 1980 et 2020, ce qui permet de ne pas accroître l'emploi des combustibles fossiles dans la production d'électricité. L'énergie éolienne, l'énergie photovoltaïque et la bioénergie apportent une contribution marginale à la satisfaction des besoins.

Structure de l'approvisionnement (en %) Scénario GOLDEMBERG

	1980	2020
Nucléaire	2,10	6,70
Hydraulique	1,80	4,10
Charbon	23,70	17,40
Pétrole	40,60	28,80
Gaz naturel	16,90	28,80
Biomasse (*)	14,40	14,20

(*) dont électricité d'origine éolienne et photovoltaïque

Ce scénario conduit à une réduction sensible des émissions de CO₂ dans le monde : 4,6 Gt en 2020 contre 5,5 Gt en 1985 (l'estimation est de 8,5 Gt dans le scénario de la Conférence mondiale de l'énergie- hypothèse centrale).

Nous ferons cependant quelques réserves sur certains points qui nous paraissent essentiels. Toute élaboration de scénarios énergétiques reposent sur l'évolution de deux variables fondamentales, la population, et plus précisément la démographie, et la technologie.

L'hypothèse de croissance de la population mondiale entre 1980 et 2020 constitue une hypothèse optimiste qui peut apparaître largement sous-estimée. La plupart des projections des Nations-Unies tablent sur un effectif mondial de près de 8 milliards d'habitants en 2020, contre à peine 7 dans le scénario de GOLDEMBERG (1). Les auteurs font aussi l'hypothèse que la transition démographique dans les pays en développement sera relativement rapide. Un milliard d'individus supplémentaires représente d'après J.M. MARTIN environ 1 Gtep en 2020 ; ce qui représente un supplément de consommation de 1,5 Tw.

Concernant la variable technologie, des efforts importants doivent être pris en compte au niveau du processus de diffusion. Les auteurs considèrent que d'ici 2020, des technologies

(1) - Commission mondiale sur l'environnement et le développement, *Notre avenir à tous*, Ed. du fleuve, 1988, p.121.

- J-M MARTIN, *L'économie mondiale de l'énergie*, La découverte, 1990, p.98.

énergétiques plus performantes se seront largement diffusées dans les pays industrialisés et dans les pays en développement. Cependant, l'échéance peut apparaître un peu proche de la situation présente. En l'absence d'adoption de règlements et d'intervention publique pour favoriser leur diffusion, il semble difficile d'envisager d'ici 2020 une pénétration généralisée sur tous les marchés.

Les travaux de GOLDEMBERG demeurent néanmoins une tentative originale de réconciliation des objectifs énergétiques avec les perspectives à long terme du développement des sociétés dans le cadre d'une approche globale. Le rendement global du système énergétique constitue une bonne performance : il s'élève en effet à plus de 78 % (consommation d'énergie finale/consommation d'énergie primaire). Ce rendement élevé s'explique par une exploitation soutenue au sein du potentiel technologique disponible du gisement d'économie d'énergie.

Un des apports majeurs de l'étude réside dans la nécessité de généraliser un potentiel technologique afin de satisfaire les besoins énergétiques au moindre coût énergétique dans un contexte dynamique où la coévolution est au cœur du processus d'acquisition du bien-être des sociétés. C'est par l'utilisation rationnelle de l'énergie que les pays industrialisés pourront poursuivre leur développement et que les moins développés pourront amorcer un réel décollage économique.

La rationalité, ici, à laquelle nous faisons référence est celle qui est garante de la survie des sociétés humaines par la conservation de la biosphère et le respect de ses équilibres. GOLDEMBERG exprime la nécessité de mieux exploiter le gisement d'économie d'énergie à l'aide des technologies disponibles tout en assurant un approvisionnement énergétique diversifié.

Une condition nécessaire et suffisante pour assurer la flexibilité du système énergétique est la maîtrise des consommations énergétiques. Il y a peu de temps, les résultats de ces travaux ont été repris et restitués dans le très long terme (horizon 2100). Deux scénarios énergétiques ont été construits par B. DESSUS et F. PHARABOD en réajustant quelques hypothèses formulés par leurs prédécesseurs concernant notamment la population et l'échéance de généralisation des technologies efficaces (1).

(1) B. DESSUS, F. PHARABOD, "Jérémie et Noé, deux scénarios énergétiques mondiaux à long terme", *Revue de l'énergie*, n°421, juin 1990, p.291-307.

Leur approche est une approche globale qui concerne les consommations d'énergie primaire exclusivement.

Les hypothèses sur l'évolution démographique mondiale sont moins optimistes et suivent les estimations de l'ONU : en 2020, la population mondiale s'élève à 8 milliards d'habitants pour s'établir à 11 milliards en 2100. Si B. DESSUS et F. PHARABOD sont en accord avec les résultats de l'étude de GOLDEMBERG et al., ils pensent néanmoins que la mise en oeuvre généralisée des technologies énergétiques les plus efficaces ne pourra être réalisée d'ici 2020 en raison d'inerties institutionnelles et de contraintes économiques et financières.

Deux scénarios sont construits : Jérémie et Noé. Ces 2 scénarios considèrent le seul potentiel technologique disponible.

Le scénario Jérémie (jeu des Energies Renouvelables et Maîtrise Intensive de l'Energie) s'appuie sur deux composantes essentielles : la maîtrise de l'énergie et la diversification des sources énergétiques (emploi de sources d'énergie renouvelables à la place des sources fossiles). Il constitue une stratégie flexible d'attente active en se donnant les moyens de retarder les changements planétaires.

Le scénario Noé (Nouvelles Options Energétiques) s'appuie sur les 2 composantes du scénario précédent avec 2 contraintes radicales : zéro nucléaire et stabilisation de la concentration de CO₂ d'ici 2100. Il constitue une stratégie flexible d'action intense avec des efforts accrus de maîtrise énergétique et un recours massif aux énergies renouvelables.

Les résultats sont présentés dans le tableau ci-dessous.

Population (milliard)	Pays industrialisés			Pays en développement			Monde		
	2020	2060	2100	2020	2060	2100	2020	2060	2100
	1,50	1,60	1,65	6,50	8,60	9,35	8,00	10,20	11,00

Consommation d'énergie primaire (en Gtep)

Jérémie	5,70	4,30	4,00	5,20	8,60	10,00	10,90	12,90	14,00
Noé	4,90	3,10	2,60	5,20	8,40	9,40	10,10	11,50	12,00

Consommation d'énergie par habitant (en tep)

Jérémie	3,80	2,70	2,40	0,80	1,00	1,10	1,40	1,30	1,30
Noé	3,30	1,90	1,60	0,80	1,00	1,00	1,30	1,10	1,10

Scénarios Noé et Jérémie - B. DESSUS et F. PHARABOD

Globalement, la consommation d'énergie primaire augmente peu : entre 19 % (Noé) et 28 % (Jérémie) de 2020 à 2100.

Dans les pays industrialisés, la consommation d'énergie par tête diminue fortement : de 4,5 tep en 1985, elle passe à 2,4 tep en 2100 ; à 1,6 tep pour le scénario exploratoire Noé. Parallèlement, dans les pays en développement, la consommation d'énergie par habitant augmente légèrement : de 0,6 tep à environ 1 tep en 2100.

A la clé de telles évolutions figurent trois orientations stratégiques essentielles : l'amélioration de l'efficacité énergétique avec l'exploitation du gisement d'économie d'énergie de la production à la consommation, la réduction des consommations d'énergies fossiles afin de réduire les émissions de CO₂, et le développement des ressources renouvelables. Les auteurs soulignent par ailleurs la nécessité de poursuivre les efforts de recherche et développement et de démonstration sur les énergies renouvelables afin d'améliorer l'efficacité des technologies énergétiques.

Cependant, une hypothèse restrictive déjà mentionnée chez GOLDEMBERG est encore présente ici : il s'agit du potentiel technologique considéré. Ce potentiel est constitué des seules technologies disponibles aujourd'hui. Dans ces conditions, le gisement potentiel de maîtrise énergétique est dès lors sous-estimé. Le gisement d'économie d'énergie est donc lui aussi sous-évalué.

Grâce au développement et à la diffusion de technologies nouvelles, nous pouvons es-compter une plus grande efficacité des technologies énergétiques, qu'il s'agissent de technologies d'économie d'énergie ou de technologies des énergies renouvelables. La prise en compte du potentiel technologique futur permet de considérer une plus forte diminution des consommations d'énergie en présence de besoins croissants (évolution démographique) et une plus grande efficacité du système énergétique.

Selon l'étude de A.J. STREB, l'amélioration de l'efficacité énergétique au niveau mondial dans les secteurs industriels, résidentiel et des transports permet de réaliser des économies d'énergie d'un montant de 276 exajoules par an dès 2050, ce qui représente 6,6 milliards de tep (1). L'emploi de technologies énergétiques efficaces avancées permet une réduction concomitante des émissions de CO₂ d'origine fossile de 6,4 milliards de tonnes (2).

A un horizon plus proche de nous, la pénétration d'innovations prévisibles devrait permettre une meilleure maîtrise de l'énergie avec une réduction des consommations d'ici l'an 2005.

Dans le cas de la France, le gisement d'économie d'énergie potentiel à l'horizon 2005 selon les projections du groupe "Prospective Energie" est de l'ordre de 25,5 à 25 Mtep (3). Dans le secteur industriel, les technologies autorisant des améliorations importantes de l'efficacité énergétique concernent les échangeurs thermiques, les pompes à chaleur, les systèmes de combustion, les procédés à haute température et les procédés de séparation. Dans le tertiaire, il s'agit de composants et de matériaux d'isolation plus performants, de systèmes efficaces de chauffage, des pompes à chaleur, des systèmes de réfrigération, d'éclairage nouveaux.

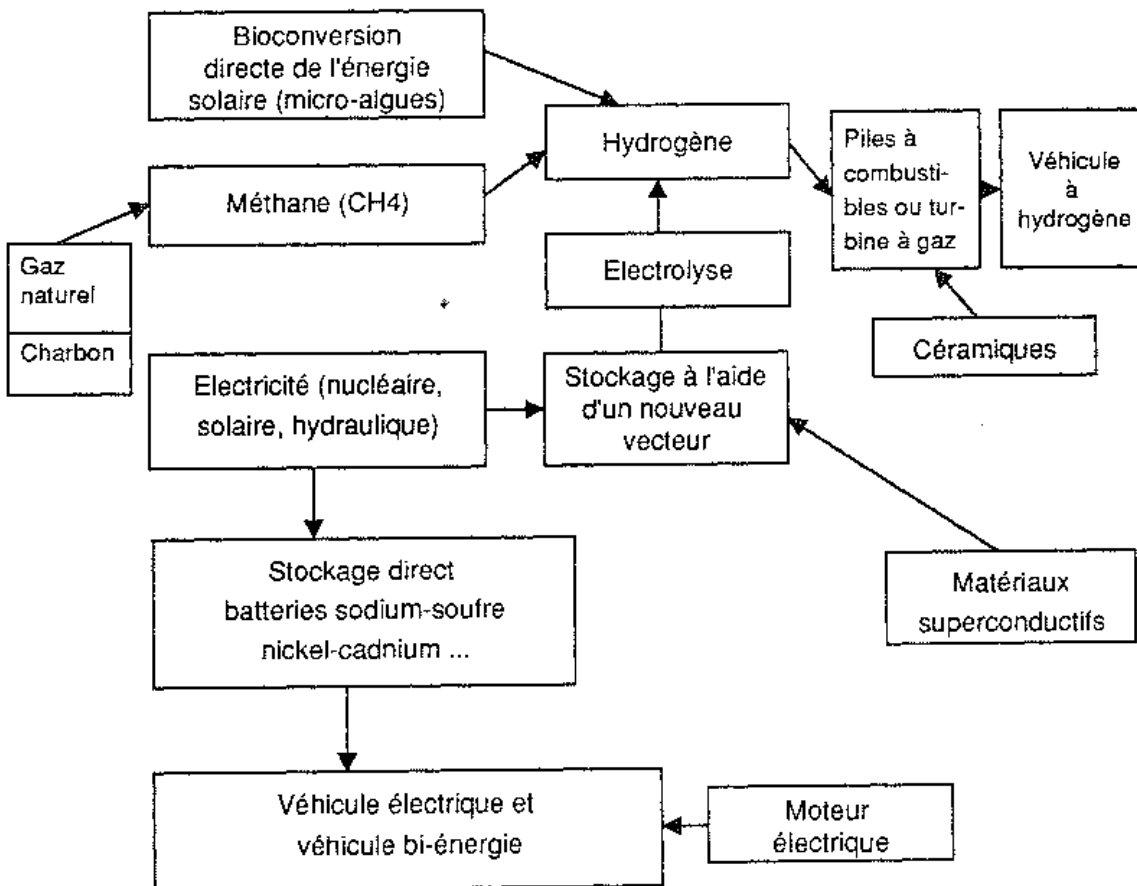
(1) Un exajoule = 10^{18} joules. Pour la conversion en tep, nous avons retenu l'équivalence : 1 tep = $4,2 \cdot 10^{10}$ J.

(2) A.J. STREB, "Energy efficiency and global warming", *Energy technologies for reducing emissions of greenhouse gases*, OCDE/AIE, 1989, vol.1, p.87-113.

(3) D'après *Problèmes économiques*, n°2250, 20.11.91, "Energie : prospective technologique", p.4-11, Extraits du rapport "Prospective technologique" du Commissariat général du plan, mai 91.

Enfin, pour le secteur des transports, le potentiel technologique futur comporte la modification des moteurs à combustion interne conventionnels, modification autorisant l'emploi d'autres combustibles que l'essence ou le gas oil. Plusieurs types de véhicules vont apparaître et se diffuser à la fin du siècle et au cours de l'an 2000 : le véhicule électrique urbain, le véhicule hybride ou bi-énergie (électrique - thermique), et le véhicule à hydrogène. Le développement de ces nouveaux moyens de transport s'appuie sur des technologies telles que le moteur à 2 temps à injection directe, les turbines, les batteries, les piles à combustibles et les moteurs électriques et sur de nouveaux matériaux (céramiques, matériaux superconductifs).

Potentiel technologique futur associé au secteur des transports (horizon 2020)



Au coeur du potentiel figure un nouveau vecteur énergétique : l'hydrogène. Il constitue un combustible "idéal" : en effet, il n'émet pas de gaz carbonique. Son stockage peut être ef-

fectué au sein de piles à combustibles ou de turbine à gaz. L'amélioration de son rendement dépend de l'emploi de nouveaux matériaux aptes à résister aux contraintes thermiques, en l'occurrence les céramiques.

Par ailleurs, l'hydrogène existe en quantité quasiment illimitée. Cependant, il constitue un carburant dangereux de par son aptitude explosive.

Du côté de l'offre énergétique, deux percées majeures sont attendues pour le prochain siècle : la fusion thermonucléaire et les centrales solaires spatiales. Des progrès continus sont effectués dans le domaine de la recherche et du développement pour la fusion.

En Avril 1988, une activité de recherche sur l'élaboration d'un réacteur expérimental (ITER)* en collaboration avec la CEE, le Japon, les Etats-Unis et l'URSS a été menée afin de démontrer la fiabilité scientifique et technologique de la fusion thermonucléaire (1). Ce réacteur entrera en service dès 2005. Un réacteur de démonstration pourrait être opérationnel dès 2025. L'auteur envisage ainsi un développement commercial à partir de 2025-2050. De toute évidence, on ne peut espérer une diffusion très large de la fusion thermonucléaire qu'à la fin du 21ème siècle.

Les centrales solaires spatiales, quant à elles, compte tenu de l'état des recherches, seraient envisageables pour la fin du siècle prochain. Elle constitue une autre manière d'utiliser la fusion thermonucléaire pour la production d'électricité. Imaginées au début des années 1960 par un scientifique américain P.E. GLASER (sous le nom de Space Power Satellite), elles "refont surface" depuis quelques années dans le cadre de différents projets (2). Cette voie consiste à placer sur orbite géostationnaire un satellite photovoltaïque de grande taille. Le flux solaire intercepté est converti en énergie électrique. Cette énergie est transmise sur la terre par microondes. Dans ces conditions, l'ensoleillement annuel est 5 fois plus élevé qu'à la surface de la terre.

B. DESSUS a comparé les productivités annuelles à surface de photopiles donnée d'une centrale spatiale et d'une centrale terrestre : le rendement est environ trois fois plus élevé pour la centrale spatiale que pour la centrale terrestre (3). L'intérêt du système réside dans

* International Thermonuclear Experimental Reactor.

(1) T.K. FOWLER, "Fusion power : expected environmental characteristics and status of R and D", Energy technologies for reducing emissions of greenhouse gases, OCDE/AIE, 1989, vol.2, p.607-620.

(2) - P. MOLGA, Science et avenir, septembre 1991, "Le solaire renaît dans l'espace", p.78-82.

- A. LEBEAU, L'espace en héritage, Seuil, 1986, p.295-300.

(3) B. DESSUS, Incertitudes et promesses technologiques à long terme dans le domaine énergétique, 1989.

le rendement élevé des opérations de conversion et de transmission (de l'ordre de 60 %). Cependant, il existe des obstacles d'ordre technique importants relatifs à la stratégie de lancement et d'assemblage dans l'espace. Des recherches effectuées par les constructeurs aéronautiques dont Boeing sont menées sur l'étude de "cargos spatiaux" supportant des masses colossales (50 000 tonnes par centrale solaire). Une autre voie de recherche engagée chez EDF et partagée par P. GLASER consiste à utiliser des canons électromagnétiques en guise de propulseurs. Enfin, la NASA explore les possibilités d'utiliser la lune et ses ressources en minerais comme un relais pour la mise en orbite gestationnaire du satellite photovoltaïque à "moindre" coût.

Cette alternative à la solution de GLASER a été exposée dès 1976 par O'NEILL devant le Sénat américain. Elle se différencie de l'approche de GLASER par le fait qu'elle exige le développement de technologies nouvelles et de systèmes nouveaux. Elle s'appuie sur la maîtrise de l'exploitation du sol lunaire qui recelle 20 % de silicium (utilisé au sein des photopiles), 30 % de métaux (mobilisable pour la construction des centrales) et 40 % d'oxygène (employé pour la fabrication des carburants de transports). De plus, on observe sur la lune, une très faible pesanteur ce qui permettrait le transit des charges de la lune jusqu'à l'orbite géostationnaire à un faible coût énergétique (22 fois moins élevé que le même envoi depuis le sol terrestre). Une telle exploitation suppose la croissance d'une véritable industrie spatiale.

Quelque soit le projet retenu, il comporte aux côtés de difficultés d'ordre technique des problèmes économiques et écologiques qui doivent être surmontés. La viabilité économique est entâchée d'incertitudes sur le coût de mise en orbite des matériaux nécessaires, sur le coût de production des photopiles sur la durée de vie de la centrale et l'amélioration des rendements de conversion. Concernant les effets sur l'environnement, une pollution importante par les produits de la combustion des lanceurs serait libérée dans la haute atmosphère (CO₂, CO notamment), pollution qui serait susceptible de perturber les équilibres physico-chimiques. Dans ces conditions, il est raisonnable d'envisager l'emploi de satellites solaires seulement à la fin du siècle prochain.

L'idée essentielle que l'on peut tirer de la mise en perspective du potentiel technologique est que le gisement potentiel de maîtrise énergétique se renouvelle perpétuellement ce qui autorise à penser une stabilisation et même une réduction de l'intensité énergétique de la consommation dans les décennies à venir. La mise en oeuvre de stratégies énergétiques globales dans le contexte d'un potentiel technologique de long terme peut conduire à un développement soutenable des sociétés.

Les approches de GOLDEMBERG et de DESSUS / PHARABOD sont des voies possibles dont l'élément essentiel est constitué par la maîtrise énergétique à travers l'amélioration constante de l'efficacité énergétique des technologies et donc l'exploitation du gisement d'économie d'énergie. Cependant, elles ne remettent pas fondamentalement en cause le fonctionnement du système énergétique. Elles visent à diversifier l'offre énergétique en s'appuyant sur le potentiel technologique disponible et à réduire sensiblement l'usage de combustibles fossiles, principal vecteur d'émissions de composants chimiques affectant la biosphère.

Dans l'ensemble des scénarios, on note une forte présence de combustibles fossiles pour la satisfaction des besoins et cela quelque soit l'horizon retenu. C'est une constante qui peut être observée dans la plupart des scénarios énergétiques construits, qu'ils intègrent ou non d'ailleurs le développement soutenable.

Ainsi, il apparaît difficile de dissocier totalement la production de combustibles fossiles des émissions polluantes, sauf à reconsidérer le système énergétique à travers un mode de fonctionnement original intégrant le potentiel technologique futur.

Dans les années 1980, des études menées au sein de l'IIASA (1) ont dessiné une stratégie technologique de long terme qui limiterait les émissions libérées par les sources fossiles dans le but d'assurer un développement soutenable. C'est dans un contexte d'offre énergétique "propre" que W.HAFELE et al. ont conceptualisé un nouveau système énergétique qui réalise l'objectif de "zéro émission" (2). Ce système se caractérise par une forte présence des combustibles fossiles.

L'idée de base de ce nouveau système énergétique appelé "Novel integrated energy system" (NIES) ou NHIES (Novel horizontally integrated energy systems) est la décomposition et la purification des imputs d'énergie primaire fossile avant leur combustion, l'intégration de ces produits décomposés (propres) et leur allocation en fonction des besoins pour l'énergie finale. La structure de l'offre énergétique dans le système existant se caractérise horizontalement par une compétition entre les différentes énergies traditionnelles (charbon, gaz naturel, pétrole et énergie nucléaire). Cependant, verticalement de la ressource primaire jusqu'à la consommation finale, les différentes énergies ne sont pas interdépendantes, il n'y a pas de possibilités de substitution entre l'amont et l'aval.

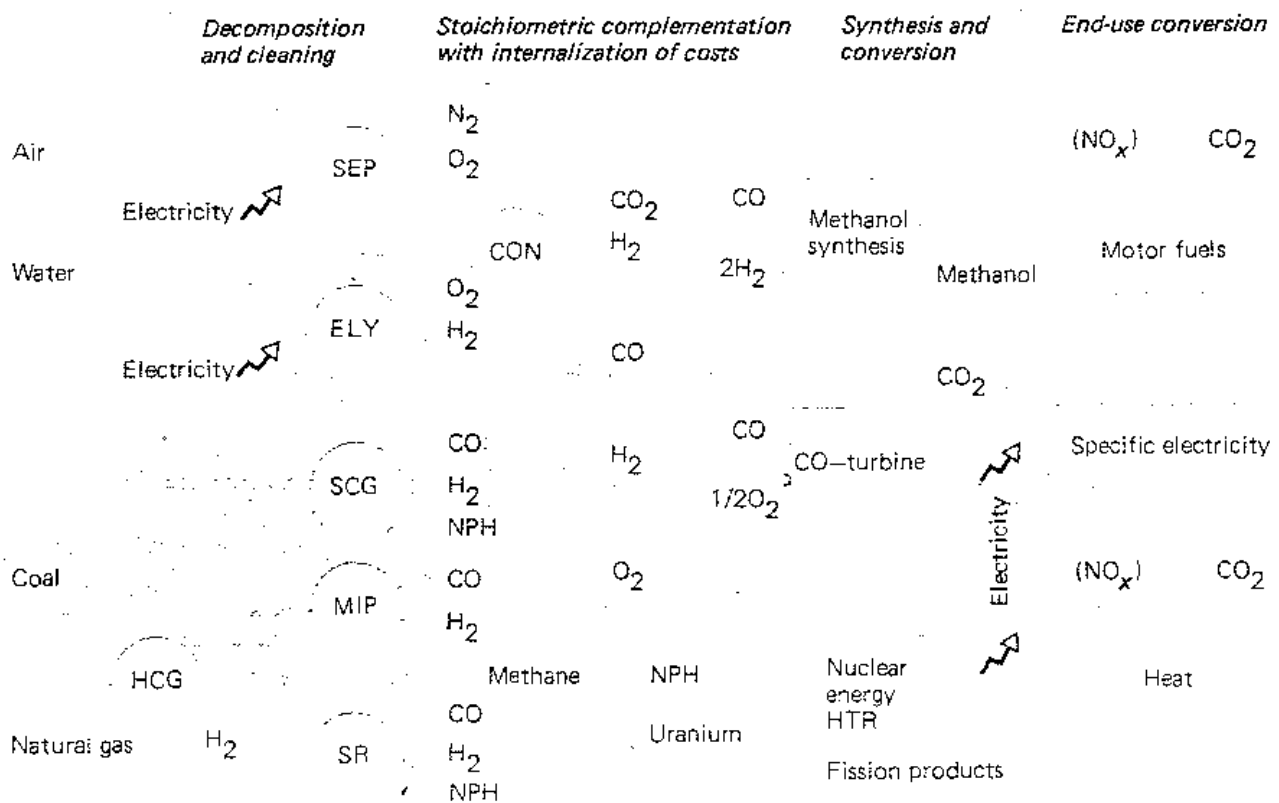
(1) International Institute of Applied Systems Analysis.

(2) W. HAFELE et al., "Novel integrated energy systems : the case of zero emissions", in W.C. CLARK, R.E.MUNN, *Sustainable development of the biosphere*, IIASA, 1986, p.171-194.

Au sein du NIES va s'opérer l'intégration des structures traditionnelles verticales à différents niveaux. (voir schéma). Le degré d'intégration le plus élevé pourra être atteint quand les différentes énergies sont décomposées en constituants élémentaires ; les consommateurs perçoivent les seuls constituants dont ils ont besoin.

Ce système est doté d'une grande élasticité : le manque d'une ressource peut être comblé par d'autres ressources sans qu'il n'y ait de répercussions sur la demande finale. Il permet l'amélioration de l'efficacité dans l'utilisation des ressources et génère peu d'impacts sur l'environnement.

W. HAFELE considère 4 inputs : l'air, l'eau, le charbon (et autres solides) et le gaz naturel (voir schéma). Les produits désirés issus de leur décomposition sont les monoxydes de carbone (CO), l'hydrogène (H₂) et l'oxygène (O₂). La décomposition des inputs énergétiques est assurée par des technologies propres dont le but est de générer une pollution minimale, voire aucune pollution. La dynamique d'introduction du NIES dans le système énergétique existant dépend des différents niveaux de réduction des émissions retenus dans le temps.



A novel integrated energy system: SEP, separation; CON, conversion; ELY, electrolysis; SCG, steam coal gasification; MIP, molten iron process; HCG, hydrogen coal gasification; SR, steam reforming; NPH, nuclear process heat; HTR, high temperature reactor.

HTR : seconde génération de réacteur

Nous considérons ici le cas de réduction des émissions au niveau moyen. Le scénario proposé s'établit à l'horizon 2030. Les substitutions interénergétiques au niveau de l'offre d'énergie primaire traduisent une diminution de la part du pétrole significative et une augmentation graduelle de l'énergie nucléaire qui devient la première source d'énergie. Les parts du charbon et du gaz naturel demeurent stables sur la période considérée (1980-2030). L'élévation de la part du nucléaire s'explique par 2 phénomènes : les procédés de raffinage au sein du NIES ont recours à l'énergie nucléaire (réacteur haute température) pour la production de chaleur à température élevée ; sur le marché de l'électricité, l'énergie nucléaire prend le relais du charbon (2010).

Au niveau de la demande d'énergie finale, la part du méthanol (CH₃OH) progresse et dès 2030 atteint 50 % du marché. Les 50 % restants sont occupés par l'électricité et les combustibles gazeux. Le méthanol se substitue très tôt au charbon. Sur le marché de l'électricité, c'est l'énergie nucléaire qui domine. Le gaz naturel progresse lentement. Sur le marché de la chaleur, le méthanol se substitue aux produits pétroliers en 2015 et au charbon en 2025. La force déterminante dans les changements qui s'opèrent sur le marché énergétique est le besoin de réduire les émissions polluantes.

L'introduction du NIES implique un changement dans l'utilisation des ressources fossiles : elles ne sont plus destinées à produire de l'électricité et de la chaleur mais principalement elles sont utilisées pour la production de méthanol. Un tel système énergétique ne génère aucune émission de CO₂ pratiquement en convertissant l'énergie primaire en énergie secondaire, en éliminant les émissions de SO₂ au stade de l'utilisation finale, et diminue fortement les rejets de NO_x.

Cette conception d'un nouveau système énergétique reposant sur l'intégration des ressources n'est pas unique. D'autres auteurs ont développé une stratégie technologique basée sur le concept de système énergétique intégré (1).

De manière générale, les objectifs stratégiques de tels systèmes sont au nombre de quatre :

- amélioration de l'élasticité du système dans la réaffectation des ressources selon les changements dans les besoins énergétiques,

(1) - M. ZEBROWSKI, P. REJEWSKI, *Technological innovations for ecologically sustainable development : the case of the chemical and Energy Industries in the context of energochemical systems technologies development*, working paper, IIASA, august 1987.

- L.S. BELYAEV et al., *Ways of transition to clean energy use : two methodological approaches*, working paper, IIASA, january 1987.

- meilleur usage des ressources avec la diminution des flux d'énergie et de matière et avec l'emploi des sous produits d'un procédé comme inputs dans un autre,
- augmentation des rendements énergétiques et donc de l'efficacité exergétique du système,
- forte réduction des émissions de CO₂.

Pour W. HAFELE et D.S. SCOTT, l'intégration des systèmes énergétiques constituent la première étape d'une transition vers l'ère de l'hydrogène, la deuxième étape étant constituée par des technologies dites d'hydrogène "propre" (1).

Ces technologies dont l'efficacité est très grande concernent notamment le secteur des transports, le secteur de transformation des sources fossiles (pour la gaséification du charbon notamment) et le secteur de l'industrie. L'ère de l'hydrogène se caractérise par le développement de synergies entre deux vecteurs énergétiques : l'électricité et l'hydrogène grâce à leurs propriétés complémentaires :

- l'hydrogène peut être stocké en grande quantité et peut constituer un stock d'alimentation chimique ou matérielle ; l'électricité non
- l'électricité peut transmettre l'énergie sans déplacer de la matière, transmettre et stocker l'information ; l'hydrogène non.

HAFELE et SCOTT considèrent que les besoins domestiques et industriels seront satisfaits grâce à ces deux vecteurs à long terme. L'électricité permettra de satisfaire les besoins d'éclairage et de chaleur principalement tandis que l'hydrogène se substituera aux combustibles liquides pour répondre aux besoins de force motrice (mobile et fixe). Cependant, l'approche de HAFELE à travers le concept de système énergétique intégré, si elle constitue une base essentielle pour un futur énergétique propre, demeure en retrait à l'égard des possibilités offertes par la base énergétique renouvelable.

Dans une vision plus large de la conception d'un nouveau système énergétique intégrant l'ensemble des ressources énergétiques et le potentiel technologique futur, A. JOLY et M. BANDELIER ont étudié à l'horizon 2030 l'émergence d'un nouvel ordre énergétique (2). Leur scénario énergétique s'appuie sur les travaux de HAFELE et al. (1986) et se réfère à l'Europe. Les parts du charbon et du pétrole vont constamment décroître tandis que le mé-

(1) W. HAFELE, D.S. SCOTT, "The coming hydrogen age : preventing world climatic disruption", Conférence mondiale de l'énergie, *L'énergie demain*, 1989.

(2) A. JOLY, M. BANDELIER, *The impact of new technologies on the environment*, working paper, may 1988, IIASA. Les auteurs sont rattachés à l'INRA de Paris Grignon et à l'École Nationale Génie rural Eaux et Forêt, respectivement.

thane (CH₄) devient de plus en plus important. Dès 2010, le méthane devrait représenter 42 % de la consommation d'énergie globale.

A la clé de cette évolution réside l'extension de la production de biogaz (combustibles à teneur élevée en méthane - 50 % à 80 %) avec le développement des biotechnologies dans un contexte de traitement des déchets urbains, agricoles et des effluents industriels. L'énergie nucléaire poursuit son développement à un rythme lent. Les énergies renouvelables progressent avec l'énergie solaire, la biomasse notamment ; leur part de marché reste modeste cependant (7 %).

Le développement de l'hydrogène en tant que carburant devient important après 2010. L'électricité devient de plus en plus importante comme source d'énergie secondaire à l'horizon 2030.

Pour JOLY et BANDELIER, l'émergence d'un nouveau système énergétique en Europe s'appuie sur une société de recyclage où les écotechnologies vont jouer un rôle majeur dans l'élimination des déchets. Les écotechnologies peuvent être réparties en 3 groupes : les technologies qui transforment les déchets/émissions afin de réduire la pollution (cleaning technologies), les technologies qui substituent un procédé moins polluant à un procédé polluant (clean technologies) et les technologies qui traitent l'output (recycling technologies). Le nouveau système énergétique permet la réduction des émissions de CO₂ grâce à l'élévation du ratio (H/C), hydrogène / carbone. Cela s'explique par la substitution du gaz naturel, du méthane, du nucléaire et des énergies renouvelables au charbon et au pétrole.

Les émissions de SO₂ et NO_x sont éliminées grâce à la substitution de la technologie de gaséification du charbon à la combustion traditionnelle (voir schéma). La dimension technologique apparaît déterminante dans l'élaboration des scénarios énergétiques de long terme. Des percées technologiques peuvent à tout moment remettre en cause les orientations et les hypothèses retenues.

La prise en compte de la nécessité d'un "développement soutenable" impose d'intégrer la dynamique technologique avec les incertitudes qu'elle comporte à très long terme. On ne peut donc raisonnablement imaginer des scénarios énergétiques sur la base restrictive du seul potentiel technologique disponible.

Il faut constamment "extrapoler" l'évolution technologique en évitant de figer les choix ce qui traduirait une profonde irréversibilité décisionnelle. La perspective d'un nouveau système énergétique dans le cadre d'une intégration horizontale des ressources énergétiques constitue une première réponse aux problèmes posés par les technologies actuelles de

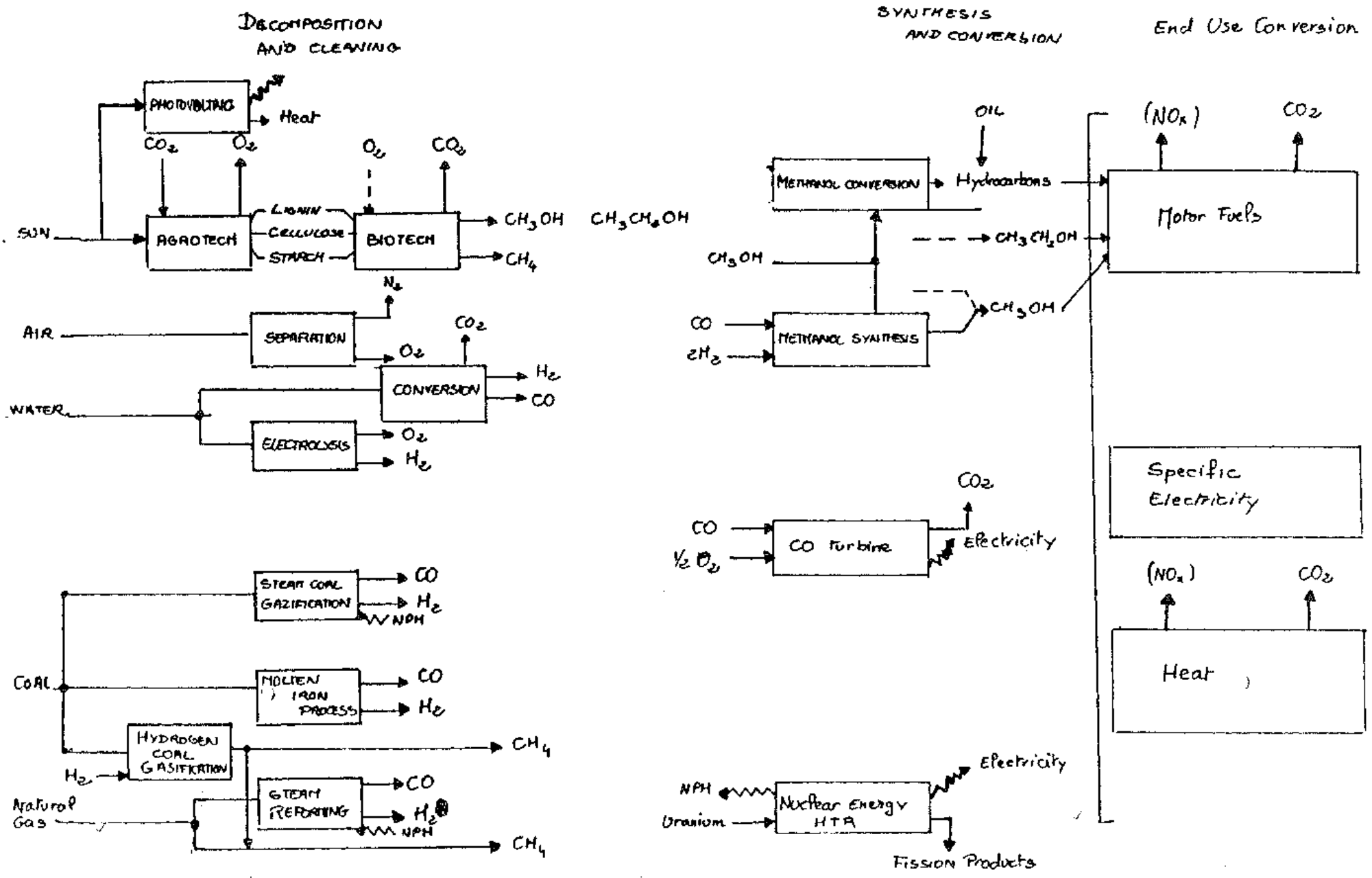


Figure 5-1: The New Energetic System.

transformation des ressources fossiles.

Une réponse complémentaire, non exclusive, est possible avec le développement de sources abondantes de basse entropie (solaire, éolien, ...) et leur intégration au sein du système énergétique présent. Cependant, cela suppose quelque soit le niveau d'intégration, la mise en œuvre de mécanismes incitatifs fortement mobilisateurs pour générer rapidement l'émergence d'un système énergétique différent.

§ 2 - Les instruments de régulation pour la protection de la biosphère : des moyens d'action pour un système énergétique soutenable

L'acheminement du système énergétique vers une nouvelle structure articulée autour de l'optimisation du gisement potentiel de maîtrise énergétique peut être stimulé par des dispositifs réglementaires et économiques dont l'objectif est la pénalisation des ressources énergétiques générant des émissions polluantes. Les objectifs énergétiques et les objectifs en matière de protection de la biosphère peuvent à long terme ainsi se réconcilier et permettre une "saine" satisfaction des besoins grâce à l'intervention publique. Il existe deux voies possibles non exclusives : l'adoption d'instruments réglementaires et la mise en oeuvre d'instruments économiques.

Les instruments réglementaires sont des mesures institutionnelles destinées à réglementer les procédés ou produits employés et à limiter les rejets polluants. Pour lutter contre la pollution de l'eau et de l'air générée par les activités énergétiques, il existe souvent plusieurs solutions possibles. Une réglementation peut intervenir de manière sélective et encourager des solutions particulières ou une combinaison de solutions. C'est ce que révèle une étude réalisée par l'OCDE dans les pays industrialisés membres de l'AIE (1). Quatre solutions ont été envisagées dans l'étude : l'adoption de dispositifs de lutte complémentaires, la substitution de combustibles, l'amélioration du rendement énergétique et l'utilisation de technologies propres.

Généralement, un ensemble de réglementations existe : réglementation de la qualité des combustibles (par exemple, relative à leur teneur en soufre), normes concernant la technologie, plafonds d'émission (par unité d'énergie produite ou d'énergie utilisée ...). On remarque tout d'abord une diversité dans l'encouragement des solutions proposées ; seule la solution de substitutions est encouragée par une réglementation relative à la qualité des combustibles alors que la fixation d'un plafond d'émission par unité d'énergie produite appuie les 4 solutions proposées. Un second point mérite une attention : c'est l'effet d'une combinaison de réglementations sur l'adoption de solutions de lutte contre les polluants. Une telle combinaison peut restreindre les choix possibles et contraindre à l'utilisation d'une solution particulière. C'est notamment le cas lorsque on souhaite lutter contre les émissions de SO₂ en imposant la suppression d'un pourcentage déterminé de soufre. Dans ce cas, un équipement de lutte antipollution va être adopté indépendamment de la teneur initiale en soufre du charbon, ce qui élimine les solutions d'amélioration du rende-

(1) OCDE/AIE, *L'énergie et l'environnement : vue d'ensemble des politiques*, 1990, p.209-211.

ment et d'adoption de techniques énergétiques "propres".

Les réglementations et les normes exercent donc une forte influence sur le choix des techniques employées et sur leur disponibilité. Elles constituent un moyen efficace pour encourager la mise au point, l'adoption et la diffusion d'innovations technologiques. La difficulté réside dans l'instauration d'un système réglementaire qui conserve une grande souplesse dans ses interventions en autorisant un choix ouvert de solutions possibles pour le respect des réglementations. "D'une manière générale, plus le nombre d'instruments réglementaires différents qui s'appliquent à une seule installation est grand, plus restreint sera le choix de l'exploitant parmi les méthodes de lutte antipollution" (1).

Ce n'est donc pas la multiplication des normes qui peut conduire à une large diffusion des technologies propres ou une plus grande efficacité énergétique et finalement à de fortes réductions d'émissions polluantes. Cependant, l'application des normes est souvent accompagnée de celle d'instruments économiques particuliers que sont les redevances afin d'inciter à un plus grand respect des prescriptions. Cela permet d'accroître l'efficacité globale de la protection de l'environnement. Les instruments réglementaires s'accompagnent ainsi d'instruments économiques afin d'orienter les choix vers des actions plus favorables à l'environnement. Il existe de nombreux instruments économiques : les redevances (de déversement applicables aux effluents ou émissions, sur produit...), les aides financières (subventions...), les systèmes de consignation, la création de marchés et les incitations à la mise en conformité. (2)

Les redevances constituent un moyen d'action très répandu dans les pays de l'OCDE (53 % des instruments employés en 1988) pour lutter contre les émissions polluantes. Elles peuvent être considérées comme des droits à verser pour disposer de biens ou de services publics. Elles reflètent le principe du pollueur payeur dans la mesure où elles correspondent au prix de la pollution que doit payer le pollueur pour utiliser l'environnement. C'est un coût supplémentaire imposé au pollueur par les autorités publiques.

Dans le cadre d'une lutte pour la pollution atmosphérique, elles constituent ainsi un prix à payer pour l'utilisation de l'air "propre" et sont perçues sur les émissions. Cela peut autoriser dans certains cas une incitation à réduire les émissions. Dans de nombreux pays, elles ont été créées afin de se procurer les moyens nécessaires pour financer les activités de lutte antipollution. Cependant, l'efficacité de cet instrument économique est faible. Quand les redevances sont employées, elles sont généralement fixées à des taux assez bas (par

(1) OCDE/AIE, opus cité, p.214.

(2) OCDE, *Instruments économiques pour la protection de l'environnement*, 1989.

rapport aux dommages dûs à la pollution et par rapport au coût total de lutte contre la pollution) ce qui limite considérablement les avantages potentiels de ce système (1). C'est surtout le cas des taxes relatives aux effluents. Dans le cas des redevances sur produit, la taxe a pour effet d'orienter les choix des consommations vers des produits moins polluants ; elles sont appliquées sur les prix tels que les combustibles fossiles (pétrole et charbon).

Les taxes sont le plus couramment appliquées comme mesures d'incitation dans le secteur des transports. L'emploi d'une fiscalité différentielle peut favoriser des choix rationnels intégrant le respect de l'environnement (exemple de la taxation différente appliquée à l'essence au plomb et à l'essence sans plomb ou encore de la taxe sur les voitures adoptée en Allemagne pour encourager l'achat de "voitures propres").

La fiscalité constitue donc un moyen d'action pour les pouvoirs publics qui peut dans certains cas se révéler pertinent et décourager l'utilisation de ressources fossiles en favorisant les substitutions. Pour y parvenir de manière plus précise et plus acceptable - la fiscalisation n'est que peu appréciée dans les pays industrialisés -, le versement de subventions est un instrument nécessaire. Les subventions peuvent s'adresser directement aux producteurs ou aux consommateurs. Ces aides financières peuvent chez les producteurs ainsi favoriser le remplacement d'installations anciennes énergivores en recourant à des technologies propres et stimuler la substitution de ressources renouvelables aux ressources fossiles. Chez les consommateurs elles incitent à l'adoption d'équipements à plus haut rendement énergétique et fonctionnant à partir de ressources renouvelables.

La majeure partie des pays de l'OCDE fournissent également des ressources financières nécessaires aux activités de R/D portant sur la mise au point de techniques de lutte anti-pollution. Nous avons vu précédemment le rôle essentiel joué par la R/D énergétique afin d'améliorer l'efficacité des technologies et de contribuer à leur diffusion.

Un système de taxes n'est pas exclusif d'un système de subventions à condition qu'il ne compromette pas le principe pollueur-payeur. Il est donc possible à l'aide d'une combinaison d'instruments traditionnels tels que les redevances et les subventions de réduire les pollutions émises et de favoriser les substitutions interénergétiques. La fiscalité intervient au sein des politiques de fixation des prix des Etats de façon à orienter les choix énergétiques. Dans les pays de l'OCDE, ces politiques sont menées de manière diversifiée dans

(1) OCDE, *L'état de l'environnement*, 1991, p.227-278. Les redevances relatives aux effluents ou aux émissions sont basées sur la quantité et/ou la qualité des polluants rejetés dans l'environnement.

l'ensemble des secteurs d'activités. Généralement, les taxes sont proportionnellement plus élevées dans les transports que dans l'industrie ou le tertiaire (1). Dans l'industrie, une différenciation des taxes a conduit à pénaliser lourdement les combustibles tels que le fuel afin de favoriser les substitutions interénergétiques (électricité, gaz naturel).

Au sein du secteur des transports, les politiques fiscales dans les pays industrialisés sont fortement différenciées, notamment sur l'essence et sur le gasoil (2). Dans les pays comme la France où les écarts sont importants, la dieselisation du parc automobile est très forte. On remarque aussi un lien entre faibles niveaux de taxation et forte consommation. Dans de nombreux cas, le prix des carburants influence la consommation et la répartition des automobiles selon leur puissance ; il constitue un moyen de pression efficace sur les utilisateurs.

L'introduction de taxes constitue un moyen efficace pour obtenir une réaffectation des ressources en limitant l'emploi de combustibles fossiles afin d'obtenir une réduction des émissions. Il y a peu de temps, la Commission Européenne a proposé d'introduire une taxe sur l'énergie modulée selon la teneur en carbone dans le but de stabiliser les émissions de CO₂ d'ici l'an 2000 (3). Cette taxe concernerait l'ensemble des ressources non renouvelables et épargnerait les énergies renouvelables. L'intérêt d'une telle taxe est double : il favorise les substitutions des ressources renouvelables aux ressources fossiles en modifiant les rapports de prix relatifs et, d'autre part, constitue un outil adapté à des pollutions dont les sources sont multiples, ce qui est le cas de l'accumulation du CO₂ atmosphérique.

Il faut noter que certains pays de l'OCDE appliquent déjà une redevance sur le carbone : c'est le cas des Pays-Bas (1,30 \$/tonne de carbone) et de la Finlande (6,10 \$/tonne de carbone). Dans la perspective d'une maîtrise des émissions de CO₂ au niveau international la mise en place d'une taxe sur les énergies fossiles peut poser des problèmes de coordination entre les différents pays. Au niveau de la fiscalité, une harmonisation serait alors un préalable nécessaire à une efficacité d'une telle taxe. Les prix des énergies étant soumis à une forte fiscalité, il en découle des différences de tarification qui réduisent l'efficacité de l'instauration d'une taxe sur l'énergie fossile identique pour tous les pays. (4)

(1) J-M MARTIN, *L'économie mondiale de l'énergie*, Ed. la découverte, 1990, p.84-86.

(2) J-P ORFEUIL, "Prix et consommation de carburants dans les transports routiers de voyageurs", *Revue de l'énergie*, n°421, juin 1990, p.314.

(3) "La CEE propose aux douze une taxe sur l'énergie", *Le Monde*, 27.09.91, p.38.

(4) Pour un examen approfondi, se reporter à : J. BENHAIM, A. CARON, F. LEVARLET, *Analyse économique des propositions et stratégies développées par les acteurs publics et privés nationaux et internationaux face au problème du CO₂*, Centre économie, espace, environnement, Paris I, octobre 1991, p.196-204. OCDE, *Parer au changement climatique*, 1991, p.77-90.

Aux côtés de la fiscalité, d'autres facteurs peuvent destabiliser l'efficacité d'une taxe sur l'énergie. La prise en compte des réactions du côté de la demande face à une hausse de prix et des réactions de l'offre avec la diminution des quantités demandées sont des éléments qui peuvent éroder son efficacité.

La mise en oeuvre d'une taxe sur l'énergie doit donc être accompagnée de mesures réglementaires afin de compenser en quelque sorte l'efficacité moindre générée par de tels facteurs.

J.P. ORFEUIL considère qu'il est possible de parvenir à une utilisation plus rationnelle de l'énergie dans le secteur des transports à l'aide d'une combinaison originale de normes et de taxes en Europe. Il propose ainsi un scénario original, le scénario Prométhée qui s'appuie sur une stratégie active des politiques de fixation des prix et aussi de norme afin de favoriser l'émergence d'innovations technologiques "rentables" pour l'environnement et de réguler efficacement la demande (1). Deux normes sont appliquées : une norme de réseau avec une limitation de vitesse sur le réseau autoroutier et une norme technique avec une limitation de la vitesse technique des véhicules. Parallèlement, une politique de prix sélective des véhicules est mise en oeuvre.

Elle consiste à taxer les automobiles en fonction de leur efficacité énergétique, autrement dit relativement à leur consommation d'énergie ; celle-ci étant appréciée par rapport à une norme de consommation. Un système de taxation des carburants plus pénalisant est également pris en compte et conduirait à un relèvement du prix moyen des carburants de 20 %. L'ensemble de ces mesures conduit à une économie de 6 Mtep pour la France et permet l'unification du marché automobile européen autour d'automobiles disposant des meilleures performances énergétiques. Au niveau de l'Europe, la régulation de la demande de véhicules par les normes et les prix permet de réaliser une économie de l'ordre de 30 Mtep.

Aux côtés des systèmes très répandus de redevances et/ou subventions mis en oeuvre dans la cadre de stratégies de lutte contre la pollution issue des activités énergétiques, il existe un autre instrument économique qui autorise une plus grande flexibilité dans les choix de solutions techniques et une plus grande efficacité dans la lutte contre les émissions. Il s'agit de la création de marchés de droits d'émissions de substances polluantes. C'est J.H. DALES qui a pour la première fois introduit cette idée en 1968. Le meilleur exemple de création de marchés est constitué par le système d'échange de droits d'émis-

(1) J-P ORFEUIL, "Transports, énergie, environnement : le scénario Prométhée", *Futuribles*, novembre 1990, p.27-54.

sion fonctionnant aux Etats-Unis dans le cadre de la stratégie de lutte contre la pollution atmosphérique.

La création d'un marché de droits s'accompagne de la création de permis d'émissions de polluants négociables (ou système d'arbitrage des émissions). Ces permis négociables sont des quotas environnementaux, autorisations ou plafonds sur les seuils d'émissions qui, une fois attribués par l'autorité compétente, peuvent être échangés. C'est donc grâce à un système fondé sur les mécanismes du marché que les objectifs de protection de l'environnement peuvent être atteints. L'arbitrage des émissions constitue un transfert partiel des décisions de l'autorité publique aux exploitants d'installations polluantes. C'est le marché qui fixe le prix du permis à travers la loi de l'offre et de la demande. Cependant, l'autorité publique détermine en fonction d'objectifs à atteindre, le volume de permis créés et donc l'offre de permis. L'arbitrage des émissions repose sur la réglementation : la première étape du processus étant la définition d'une norme de qualité de l'environnement et donc la détermination du niveau total des émissions. Compte tenu de ce plafond fixé, une entreprise qui émet moins de pollutions que ne l'autorise le plafond peut vendre ou échanger les différences entre les 2 niveaux d'émissions avec une autre entreprise qui pourra polluer davantage par rapport à son plafond initial.(1)

Cet arbitrage peut être appliqué notamment dans un système de crédits où les réductions d'émissions excédentaires sont alors stockées dans des crédits de réduction des émissions (Emission Reduction Credits) (2).

S. FAUCHEUX et J.F. NOEL considèrent que pour lutter efficacement contre les pollutions globales, la création d'un marché de droits d'émission pour les CFC permettrait d'obtenir une réduction de la production de CFC en conformité avec les prescriptions du Protocole de Montréal (3). Ils considèrent qu'un tel système serait par ailleurs plus flexible qu'un système de taxes dans le cadre d'une révision des restrictions, c'est à dire d'une aggravation des prescriptions du Protocole. Il suffirait dans ce cas en effet de réduire l'offre de permis ce qui, induirait une hausse de son prix. Les effets du système de marché de droits sont intégrés dans le calcul économique des entreprises.

Des applications de tels instruments obéissant aux lois du marché pourraient être envisa-

(1) OCDE, *Politique de l'environnement, comment appliquer les instruments économiques*, 1991, p.121-123.

(3) S. FAUCHEUX, J-F NOEL, *Les menaces globales sur l'environnement*, La découverte, 1990, p.87-88.

(2) OCDE/AIE, *L'énergie et l'environnement : vue d'ensemble des politiques*, 1990, p.58.

gées pour une réduction globale des émissions de CO₂ ; de SO₂ et de NO_x aussi. En fixant une teneur en ppm de CO₂ dans l'atmosphère à un niveau donné, les autorités publiques proposeraient un volume déterminé de permis d'émission. Ces permis seraient soit loués, soit achetés en priorité par des firmes appartenant à des secteurs d'activité fortement générateurs d'émissions polluantes ; notamment, le secteur de transformation des ressources fossiles. Dans ce cas, l'allocation des permis serait fonction des émissions actuelles et favoriserait les firmes qui contribuent le plus à l'accumulation du CO₂ atmosphérique ; ce serait les pays industrialisés qui seraient alors concernés.

Cependant, l'efficacité d'un marché de droits à polluer au niveau global peut être limité par le caractère négociable des transactions : les pays les plus riches peuvent accumuler des droits d'émissions et exercer une pression sur les pays les moins riches afin qu'ils vendent leurs droits. La mise en oeuvre d'un tel marché doit par ailleurs passer par le règlement d'un certain nombre de questions : qui doit posséder les permis d'émissions ? comment les différents Etats vont-ils répartir les droits entre les diverses sources ? Comment l'affectation initiale des permis doit-elle s'effectuer ? Faut-il répartir les droits sur la base d'une réduction uniforme par rapport à leur niveau actuel ou bien d'une réduction proportionnelle au PNB ?

Pour S. FAUCHEUX et J.F. NOEL, l'arbitrage des émissions devrait tenir compte des taux d'émission de CO₂ par habitant ce qui aurait comme avantage de ne pas pénaliser les pays peu émetteurs de CO₂ (pays en développement, France et Japon par exemple). Un tel arbitrage pourrait de plus conduire à la diminution de telles émissions dans des pays où le déboisement sévit (Brésil par exemple). L'affectation des permis en fonction de la population adulte est considérée comme la règle la plus équitable. (1)

A l'échelle mondiale, l'application des concepts de "globalisation mondiale" et de "compensation des émissions" pourraient constituer des voies opportunes. (2).

Le premier concept autorise une localisation différenciée des plafonds d'émissions selon les sources en respectant un niveau d'émissions totales dans le cadre d'une approche globale (mécanismes semblables à celui de l'arbitrage des émissions). Le second autorise des émissions supplémentaires provenant des nouvelles sources ponctuelles dans un site particulier à condition que ces émissions soient compensées par des réductions ailleurs. (mécanismes fondés sur la compensation).

(1) OCDE, *Parer au changement climatique*, 1991, p.97.

(2) OCDE/AIE, opus cité, p.217-218. La compensation des émissions peut résoudre de nombreux problèmes d'environnement en favorisant notamment le reboisement.

La "globalisation mondiale" est un moyen de traiter la pollution atmosphérique par le respect des politiques nationales des différents Etats qui intègrent les préventions et les améliorations déjà réalisées. Chaque pays détermine des plafonds d'émissions exprimé en pourcentage des réductions à atteindre à une date future par rapport à un niveau d'émissions observé à une date antérieure. Il s'agit là d'une "globalisation nationale" qui constitue le pivot de la lutte contre la pollution atmosphérique dans un contexte global. Chaque pays est amené sur la base d'une "globalisation nationale" à participer à la réduction des émissions en recourant à des moyens particuliers que lui seul détermine.

L'application d'une "globalisation mondiale" implique alors d'imposer des fardeaux différents aux pays signataires. Il n'y a plus de réduction uniforme mais différents pourcentages de réduction pour les différents pays. Elle constitue une perspective flexible de limitation des émissions indépendamment de la localisation de la source.

La création de marchés de droits d'émissions autorise une diversité dans les modalités d'application au niveau national comme au niveau global. Elle apparaît légitimée par la recherche d'une plus grande efficacité économique des moyens d'action intégrant la qualité de l'environnement. C. HENRY démontre que le fonctionnement d'un marché des droits à polluer possède 2 attributs essentiels : d'une part, la répartition de la pollution totale entre tous les pollueurs est efficace - répartition efficace des droits - et d'autre part, le niveau de pollution engendré par le marché est proche du niveau socialement optimal (1).

Les instruments économiques et les instruments règlementaires sont nombreux et variés, ce qui autorise une large ouverture dans les choix pour mettre en oeuvre une régulation de l'environnement aux niveaux local, régional et mondial. Une meilleure efficacité dans les orientations à entreprendre est conditionnée par une combinaison originale de normes et règlements et de moyens économiques (taxes, droits d'émissions), combinaison accordant une souplesse dans les choix technologiques, dans les solutions à apporter en présence d'émissions polluantes. Les instruments économiques devraient laisser une plus grande place aux instruments règlementaires en évitant toutefois une prolifération abusive de normes qui entraverait l'efficacité économique.

Dans le cadre de pollutions globales, l'évolution du système énergétique pourrait être accélérée par l'établissement de normes et de règlements restrictifs dans l'usage des res-

(1) C. HENRY, "Efficacité économique et impératifs éthiques : l'environnement en copropriété", *Revue économique*, vol.41, n°2, mars 1990, p.195-214.

sources fossiles. Cela apparaît d'autant plus raisonnable que les choix entre générations successives sont des constituants de la dynamique du système énergétique ; cela afin d'éviter la dilapidation du patrimoine énergétique. C. HENRY reconnaît la prééminence de la valeur éthique exprimée à travers la norme sur les prix dès lors que l'équité intergénérationnelle doit être assurée (1).

Par ailleurs, accorder une plus grande place à la norme semble souhaitable tant il est difficile d'estimer la valeur des services environnementaux en rendant compte de la dégradation de la biosphère ; leur valeur peut être infinie. Cette approche rejoint ce que R. PASSET a appelé la "gestion normative sous contrainte" (2). Ce mode de gestion consiste à prendre en compte dans l'optimisation économique les contraintes exprimant les interdépendances entre la biosphère et l'économie. Des normes de pollution optimale sont fixées en fonction de la rationalité économique mais aussi et surtout des équilibres écologiques. L'ensemble des normes établies s'accompagne d'un ensemble de contraintes, contraintes qui traduisent une limitation du nombre de choix possibles. Ces choix limités et ainsi déterminés permettent de participer au développement soutenable des sociétés.

Dans ce contexte, l'emploi d'instruments réglementaires n'est pas contradictoire d'une intervention de moyens d'incitation ou de dissuasion financières. R. PASSET considère que ces deux modes d'intervention sont plus complémentaires qu'en réelle opposition.

La convergence vers un système énergétique soutenable repose sur l'existence d'une régulation active de la biosphère qui combine des interventions réglementaires et économiques afin de réallouer les ressources énergétiques dans les usages et d'élever l'efficacité énergétique des technologies de transformation (du producteur au consommateur). C'est une condition essentielle pour augmenter la flexibilité du système énergétique et sa capacité de réponses face aux incertitudes technologiques et climatologiques.

Les bases d'un nouveau système énergétique sont jetées. Il demeure cependant à préciser les modalités de la transition du système présent vers un tel système.

(1) C. HENRY, opus cité, p.194.

(2) R. PASSET, "Les approches économiques de l'environnement", *Les Cahiers Français*, n°250, mars-avril 1991, p.45-55.

Section 2 - La gestion de la transition

§1 - Les sentiers d'évolution : une évolution irréversible vers la rupture ?

L'histoire du système énergétique est une histoire ponctuée par l'émergence de cycles au sein desquels prédomine une source d'énergie particulière tandis que les autres sont de fait marginalisées ou reléguées à des usages secondaires. C'est le sens de l'évolution cyclique qui a conduit le système énergétique à n'obéir qu'à des lois de nature économique dont la justification résidait dans son imbrication au sein de la sphère économique des hommes. Cependant, cette logique est erronée. Cette évolution exclusive est une profonde aberration : les équilibres de l'ensemble des écosystèmes ont été déstabilisés par l'ignorance perverse des lois de la thermodynamique, ignorance qui a conduit le système énergétique sur la voie dangereuse des menaces globales qu'il fait peser sur l'"espace terrien"

Il apparaît ainsi essentiel de changer nos modes de penser afin de favoriser l'émergence d'un système énergétique soutenable. Dans la phase de transition vers un tel système, le problème de l'énergie doit être conçu différemment. G. BOCCHI et M. CERUTI avancent le concept de "bricolage énergétique" pour traduire la nécessité d'observer une pluralité de sources d'énergie et de rejeter ainsi la suprématie d'une énergie sur toutes les autres (1). La diversification des sources d'énergie au sein du système constitue pour nous un facteur essentiel de la naissance d'un système énergétique soutenable. La propriété de diversité est, nous l'avons vu, fondamentale pour assurer une plus grande stabilité du système et finalement le doter d'une grande capacité homéostatique (propriété d'adaptabilité, d'élasticité).

Nous allons donc préciser quels sont les sentiers possibles d'évolution vers un système énergétique soutenable et quelles sont les lois d'évolution qui les orientent.

Un sentier unique n'existe pas. L'évolution va se caractériser par une multitude de processus de changement dont l'aboutissement se traduit par une nécessaire rupture structurelle du système énergétique.

Tout d'abord, nous devons nous rappeler que le système énergétique est un système ouvert sur la biosphère qui se situe loin de l'équilibre thermodynamique, et donc caractérisé

(1) G. BOCCHI et M. CERUTI, "les nouveaux jeux planétaires", in E. MORIN, G. BOCCHI, M. CERUTI, *Un nouveau commencement*, Seuil, 1991, p. 167.

par une production non nulle d'entropie ($dS_i > 0$) - présence de processus irréversibles - et par d'intenses échanges avec le milieu - apports d'entropie provenant de la biosphère ($dS_e > 0$).

D'après les enseignements de la thermodynamique de non-équilibre, le principe d'évolution du système est l'ordre par fluctuations avec la création de structures de non-équilibre ou structures dissipatives (1). Loin de l'équilibre, de nouvelles structures de la matière peuvent s'organiser spontanément sous l'effet de perturbations ou fluctuations locales (phénomène d'auto-organisation). De telles réorganisations de la matière augmentent la dissipation et donc la production d'entropie. L'entropie est alors créatrice d'ordre, de diversité croissante et de plus grande complexité. Les fluctuations amènent le système vers des états ou des structures différents. Les fluctuations dont il est question ici concernent les perturbations au sein des relations entre les variables du système et les valeurs des variables elles-mêmes. Elles se situent au sein des processus internes et externes de changement.

Une autre caractéristique essentielle du système énergétique est la non linéarité des processus mis en oeuvre entre les composants du système (relations entre consommation d'énergie et croissance démographique, ou relation entre extraction des ressources et production de CO₂ ...). Le rôle des non-linéarités est important dans la production de cohérence des structures dissipatives ou encore dans le comportement erratique des systèmes chaotiques.

I. PRIGOGINE et I. STENGERS définissent un comportement "chaotique" de la manière suivante : "c'est un comportement typique des systèmes caractérisés par un attracteur étrange. Un comportement est chaotique si des trajectoires issues de points, aussi voisins qu'on le veut dans l'espace des phases, s'éloignent les unes des autres au cours du temps de manière exponentielle" (2). Un attracteur étrange ou chaotique est caractérisé par une dimension fractionnaire. Selon l'analyse de G. et C. NICOLIS, la variation climatique qui a marqué l'histoire de notre planète a été engendré par un attracteur chaotique de dimension 3,1 (3).

La biosphère est régie par les lois de la thermodynamique, lois qui sont exprimées sous

(1) I. PRIGOGINE, I. STENGERS, *La nouvelle alliance*, Gallimard, 1979. Se reporter au chapitre 3 de la thèse.

(2) I. PRIGOGINE et I. STENGERS, *Entre le temps et l'éternité*, Fayard, 1988.

(3) op.cité, p. 83.

forme d'équations différentielles non linéaires ; les effets ne sont donc pas proportionnels aux causes.

Les systèmes non linéaires sont des systèmes dotés d'une grande variété évolutive. L'état vers lequel un tel système peut évoluer à long terme n'est pas unique. Plusieurs solutions ou attracteurs existent (1). Ainsi, la notion d'attracteur symbolise la diversité qualitative des systèmes producteurs d'entropie (systèmes dissipatifs).

Une autre notion importante dans l'évolution des systèmes est celle de point de rupture ou point des bifurcations ou encore "points catastrophiques".

Les "points catastrophiques", selon la théorie des catastrophes développée par R. THOM, ne signifient pas la mort du système : "La "catastrophe" est donc une "manoeuvre de survie" d'un système mis en demeure de quitter sa caractéristique normale" (2). La catastrophe est ainsi un saut brutal qui permet au système de subsister lorsqu'il devrait normalement "mourir".

I. PRIGOGINE et I. STENGERS considèrent que la bifurcation est un point critique à partir duquel un nouvel état devient possible : "les points d'instabilité autour desquels une perturbation infinitésimale suffit à déterminer le régime de fonctionnement macroscopique d'un système sont des points de bifurcation" (3). Une bifurcation est, selon l'expression de C. NICOLIS, "une modification qualitative du système, au cours de laquelle, par exemple, le nombre d'attracteurs passe de un à deux" (4). Une bifurcation peut se produire quand les paramètres du système varient (par exemple, teneur en CO₂ atmosphérique).

Plusieurs bifurcations sont possibles dans l'évolution du système vers un état final nouveau ; cet ensemble de bifurcations ou diagramme de bifurcations constitue l'histoire du système. Cette histoire réunit deux éléments indissociables : le déterminisme des équations différentielles et le hasard des fluctuations qui décident vers quel(s) état(s) le système s'oriente. L'évolution climatique, par exemple, traduit cet apparent paradoxe : elle obéit à une dynamique chaotique et à la fois elle est régie par des lois déterministes. C'est en 1963 que E. LORENTZ a découvert le chaos déterministe. En dépit du déterminisme des lois, un système dynamique peut être imprévisible, chaotique ; cela s'explique par la sensi-

(1) En thermodynamique classique, l'état d'équilibre constitue un attracteur ; "ce" vers quoi tend le système.

(2) R. THOM, *Modèles mathématiques de la morphogénèse*, C. Bourgois éditeur, 1980, p.86.

(3) I. PRIGOGINE, I. STENGERS, *La nouvelle alliance*, Gallimard, 1979, p. 229.

(4) C. NICOLIS, "le climat peut-il basculer ?", *La Recherche*, La Science du désordre, Mai 1991, p. 586.

bilité aux conditions initiales. Le système est alors très sensible à des variations ou fluctuations infinitésimales de ses paramètres. C'est le fameux "effet papillon" : le battement des ailes du papillon peut déclencher une tornade, une tempête.

Depuis quelques années, la dynamique de l'évolution, du changement s'intéresse plus au rôle déterminant du hasard, du désordre dans l'émergence de structures complexes, ordonnées et cohérentes qu'au rôle du déterminisme. Il existe un débat controversé sur le statut du hasard dans les sciences en tant qu'élément explicatif de la structuration de systèmes complexes et de leur évolution (1).

Cependant, deux résultats essentiels sont à souligner :

- l'évolution dynamique d'un système régie par des relations déterministes peut aboutir, pour des valeurs données des paramètres du système, soit à un mouvement chaotique, soit à une nouvelle forme d'organisation (nouvelle structure dissipative) L'état futur du système ne peut donc être connu à partir de la connaissance des conditions initiales (connaissance imparfaite)
- quand les valeurs des paramètres changent, l'évolution du système peut aboutir à un comportement chaotique ou à une nouvelle forme d'organisation.

Ces deux enseignements sont d'ailleurs à l'origine de développements récents d'une science économique nouvelle qui intègre dans son champ d'analyse les apports des concepts d'auto-organisation et de chaos (2). Pour notre propos, nous allons tenter de comprendre à l'aide de la thermodynamique de non-équilibre, les cheminements possibles du système énergétique vers une nouvelle structure ordonnée et cohérente (émergence de nouvelle structure dissipative).

Si son évolution à venir ne peut être parfaitement connue en raison des insuffisances relatives aux interactions au sein du biosystème (système énergétique et biosphère), en revanche, il est possible de préciser quelles sont les perturbations mineures qui peuvent l'amener vers de nouveaux états plus ou moins stables de son évolution. Nous considérons que l'évolution du système vers un état final futur ne peut être exprimée en terme de

(1) A propos du déterminisme et du hasard :

- AMSTERDAMSKI S. et al., *La querelle du déterminisme*, Gallimard, 1990.
- G. PESSIS-PASTERNAK, "Hasard ou déterminisme", *Futuribles*, Septembre 1991, p. 55-66.
- La Recherche, *La Science du désordre*, Mai 1991

(2) Pour une synthèse originale, sur ce sujet, se reporter à : J. LESOURNE, "L'état des recherches sur l'ordre et le désordre en micro-économie", *Economie Appliquée*, tome XLII, 1989, n°3, p. 11-39. Voir également : J. LESOURNE, *Economie de l'ordre et du désordre*, Economica, 1991.

trajectoire compte tenu du paradigme auquel ce concept est rattaché (monde de NEWTON). C'est le paradigme de la réversibilité, de la continuité. Ce paradigme conservatif ne peut traduire l'évolution du système énergétique.

Nous retenons donc le concept de sentier d'évolution en tant que cheminement évolutif déterminé par des processus irréversibles au sein desquels des ruptures peuvent apparaître en des points de bifurcation. Un sentier n'est donc pas indépendant des états passés mais est fortement dépendant de perturbations locales qui traduisent l'impossibilité de connaître l'état final futur du système indépendamment de ces fluctuations locales. On peut présenter les caractéristiques principales associées au sentier d'évolution et à la trajectoire.

Sentier d'évolution	Trajectoire
<ul style="list-style-type: none"> - rôle des processus irréversibles dans l'évolution - multiplicité des attracteurs stables et/ou instables (rôle des bifurcations) - non linéarité des processus - dépendance forte à l'égard de faibles perturbations ou fluctuations <p>→ Paradigme des systèmes dissipatifs</p>	<ul style="list-style-type: none"> - réversibilité de l'évolution - attracteur unique stable - linéarité de la trajectoire (uniformité) - prédéterminée <p>→ Paradigme des systèmes conservatifs</p>

La présence de points de bifurcations au sein du système met en évidence l'existence de seuils au delà desquels le système va évoluer vers un nouvel état stable ou instable caractérisant une nouvelle structure organisée. De tels points de ruptures existent au niveau des processus internes et externes de changement du système énergétique. Concernant les processus internes, la diminution de la variété du système et l'instabilité qui en résulte constituent un seuil limite (menace de la capacité homéostatique du système). L'appauvrissement du patrimoine énergétique - perturbation locale - avec la raréfaction des ressources résultant de la non application du principe de conservation détermine le mode de

fonctionnement du système énergétique, mode destructeur en perpétuelle rupture avec son environnement. Concernant les processus externes, les implications de l'appartenance à la biosphère s'expriment en termes négatifs par l'existence de rejets de nature hétérogène non absorbés par l'environnement.

Là aussi, il existe un seuil - capacité d'assimilation du milieu - de nature écologique que le système énergétique ne respecte pas : il se trouve alors dans un état de désorganisation locale où il ne parvient pas à recycler, ou à éliminer à la source des quantités croissantes de polluants. (dépassement de la capacité de charge de la biosphère avec accroissement du CO₂).

Les sentiers d'évolution vers une rupture irréversible dans l'organisation structurelle mais aussi fonctionnelle (finalité du système) du système sont nombreux : il n'existe pas une histoire mais une multitude d'histoires possibles dans le long terme. L'histoire qui prévaut sera de toute manière orientée par la discontinuité des processus.

Les enseignements de l'approche de C.S. HOTELLING expriment le rôle de cette discontinuité dans l'évolution de structures organisées telles que les écosystèmes avec la succession de ruptures d'équilibre, de désorganisation et de réorganisation (1). Il faut noter ici l'importance du fait suivant : les systèmes vivants demeurent organisés parce qu'ils sont loin de l'équilibre thermodynamique. C'est cette propriété de non-équilibre qui est essentielle dans leur aptitude au changement, à la complexité croissante et à leur pérennité. C'est en ce sens que la propriété de non équilibre est fondamentale dans la lutte contre l'entropie dans les systèmes ouverts.

J. HENRY écrit : "Finally, in a state of inequilibrium, the potential for change is continually being used up and recreated, thus making it fairly obvious that this notion is only applicable to open systems" (2).

Les sentiers d'évolution possibles dépendent du type de fluctuations locales ou perturbation qui se manifestent. Lorsque le système est perturbé de manière aléatoire, on peut considérer que le système est auto-organisateur et réagit par un accroissement de complexité et d'efficacité. La thermodynamique de non-équilibre se réfère à ce type de fluctuations locales et aléatoires (3). Dans ce cas, les événements futurs qui influencent le systè-

(1) reporter au chapitre 7, section 1, §2.

(2) J. HENRY, "Equilibrium as a process", *Economie Appliquée*, tome XL, 1987, n°3, p. 464.

(3) H. ATLAN, *Entre le cristal et la fumée, Essai sur l'organisation du vivant*, Seuil, 1979, p. 166-167.

me énergétique apparaissent comme des "surprises" au sens de C.S HOLLING. Il s'agit d'occasions, de "crises" qui se présentent spontanément et qui constituent une chance pour le système de se réorganiser afin d'accroître son efficacité, son élasticité.

Le système énergétique actuellement se trouve sur un sentier d'évolution où les perturbations de la biosphère constituent un point critique en lequel le système est instable. Plusieurs bifurcations sont envisageables selon le sens des contraintes telles que l'évolution démographique, la relation énergie-biosphère ...

Mais le système peut aussi être perturbé de l'extérieur de manière déterministe par des perturbations organisées. Dans ce cas, H. ATLAN considère que l'organisation future du système existe déjà au sein de ces effets organisés qui le structure et que dans ces conditions il ne s'agit pas d'un système auto-organisateur, c'est à dire, au sens de la thermodynamique de I. PRIGOGINE, qu'il ne s'agit pas d'une structure dissipative.

Au sein du système énergétique, nous pensons que ce sont surtout des perturbations de nature aléatoire qui vont être déterminantes dans son évolution. Cela implique que le système peut s'orienter vers plusieurs sentiers sans que l'on puisse déterminer lequel va prévaloir ; tout dépend des fluctuations aléatoires de un ou quelques paramètres du système. Comme le système énergétique est en interaction permanente avec la biosphère, la nature des perturbations qu'il reçoit et qu'il renvoie est aléatoire ; qu'il s'agisse de perturbations au sein des processus externes de changement, comme d'ailleurs au sein des processus internes.

Compte tenu de la nature aléatoire des perturbations, deux conséquences sont possibles :

- soit les fluctuations se stabilisent à l'intérieur de la structure du système (zone de stabilité locale)
- soit elles se propagent dans le système et sont à l'origine d'une nouvelle structure (état stable ou instable)

Il y a franchissement d'un seuil critique, d'un point de bifurcation.

Nous pouvons ainsi dessiner les contours d'une évolution du système énergétique vers un système énergétique soutenable. Si les fluctuations s'amplifient au voisinage du point de bifurcation, le système énergétique va subir un changement radical de sa structure et de son fonctionnement (changement qualitatif). Dans ce cas, il évolue vers une structure flexible en augmentant sa variété et sa capacité homéostatique pour s'établir à un niveau compatible avec les équilibres de la biosphère. Si, au contraire, elles régressent, la structure globale du système énergétique demeure inchangée.

Dans les deux cas, au delà du point de bifurcation, l'attracteur du système peut être soit unique, soit multiple, soit stable, soit instable. S'il est multiple, on a alors une zone de stabilité où le système peut fluctuer sans pour autant subir des changements qualitatifs (système multistable).

Les conditions de stabilité dépendent du type de fluctuations -ici aléatoires- et de la distance à l'égard de l'équilibre. Plus on s'éloigne de l'équilibre, plus il y a d'instabilité et plus les fluctuations s'amplifient (1). Parallèlement, en augmentant l'écart à l'équilibre, le nombre de structures différentes de la structure initiale augmente, structures qui peuvent être d'abord stables puis instables.

Les changements successifs de valeurs des paramètres du système l'amène vers des états successifs où alterne stabilité et instabilité ce qui traduit la sensibilité du système loin de l'équilibre à des facteurs négligeables près de l'équilibre. (traduction d'un changement structurel)

Finalement, la phase de transition du système énergétique est caractérisée par une instabilité liée à l'amplification de perturbations au delà du point de bifurcation. Le changement de structure sera d'autant plus important que les fluctuations s'amplifieront dans tout le système.

La nouvelle structure qui émerge au terme de la phase de transition est caractérisée par une plus grande diversité, ce qui lui confère une stabilité relative. Cette stabilité sera d'autant plus grande que l'attracteur n'est pas unique : si le système est doté de plusieurs attracteurs, une zone de stabilité peut être définie à l'intérieur de laquelle des fluctuations vont affecter le système sans qu'il puisse sortir de la zone. L'apparition de ce nouvel état ou structure stable qui dépend des fluctuations traduit une plus grande flexibilité du système.

L'évolution dynamique du système énergétique vers un système énergétique soutenable est donc une évolution où alternent stabilité et instabilité. Cette évolution s'exprime par une profonde irréversibilité : à aucun moment, l'état initial antérieur ne peut être retrouvé. L'évolution complexifiante de sa structure et de son fonctionnement est déterminée par des conditions initiales et par le hasard des perturbations.

Il faut noter ici que sa complexité née du nombre croissant d'interactions entre les éléments du biosystème, interactions dont le vecteur de transmission est constitué par les technologies ; elles mêmes vecteur de transmission de néguentropie ou information. L'ex-

(1) I. PRIGOGINE, I. STENGERS, *La nouvelle alliance*, Gallimard, 1979, p.229-230.

ploitation du gisement potentiel de maîtrise énergétique est donc une variable stratégique dans l'avènement du système énergétique soutenable. Plus un système est organisé, et plus il contient d'informations. L'accumulation du savoir et sa transmission au sein d'un support matériel, les technologies, peut ralentir l'évolution entropique du biosystème à condition qu'elle repose sur les principes de conservation et d'équité (1).

L'émergence du système énergétique soutenable est donc intrinsèquement liée à la transmission de la connaissance accumulée et véhiculée par la matière organisée et ordonnée au sein du vecteur technologique. Nous allons ainsi pénétrer dans un paradigme dont la dimension physique n'est plus limitée à un espace étriqué et contraint par des frontières artificielles. C'est au sein de ce nouveau paradigme qu'un système énergétique soutenable peut véritablement émerger.

(1) En effet, si ces deux principes ne sont pas respectés, l'accumulation des organes exosomatiques accélère la dégradation entropique (évolution accélérée par la dissipation de la matière et de l'énergie).

Se reporter à N. GEORGESCU-ROEGEN, *Energy and economic myths*, Pergamon press, 1976.

§ 2 - La recherche d'une transition flexible : émergence d'un nouvel ordre

La transition vers un système énergétique soutenable impose aujourd'hui en présence d'incertitude de retenir le sentier d'évolution le moins irréversible. Dans un univers où l'information est croissante, le choix retenu doit être un choix flexible. Le passage vers un nouveau régime de fonctionnement ne peut être, nous l'avons vu, immédiat : quand les fluctuations s'amplifient au voisinage du point critique, le système énergétique peut passer par des phases de stabilité et d'instabilité. Chaque phase d'instabilité peut aboutir à l'émergence d'une structure dissipative nouvelle.

Quelque soit la durée de la transition, elle suppose la mise en oeuvre de mécanismes de régulation novateurs destinés à favoriser l'émergence d'une structure nouvelle flexible, d'un système énergétique dotés de grandes facultés d'adaptabilité et d'élasticité.

Si l'état final stable qui prévaudra d'ici quelques décennies ne peut être connu aujourd'hui, on sait cependant quels sont les états potentiels futurs qui doivent être évités, compte tenu des connaissances imparfaites des mécanismes de régulation opérant au sein du biosystème.

Les mécanismes de régulation à oeuvrer doivent "éclairer" la structure du nouveau système énergétique. Celui-ci a pour finalité de satisfaire des usages énergétiques en respectant des principes fondamentaux tels que le principe de conservation. En intégrant la dimension écologique, il s'appuie sur les lois de la thermodynamique. En intégrant le long terme, il s'appuie sur le principe d'équité intergénérationnelle et sur la flexibilité des choix intertemporels.

Le système énergétique soutenable suppose ainsi une réforme du paradigme qui le soutend. Ce nouveau paradigme est le paradigme planétaire. Ce paradigme désigne à la fois la dimension englobante de la biosphère au sein de laquelle des mécanismes de régulation originaux lui permettent de se perpétuer - hypothèse Gaïa - et l'espace physique au sein duquel les espèces et l'espèce humaine en particulier évoluent.

La nature des interactions entre système énergétique et biosphère nous oblige à nous situer au niveau du global pour penser les finalités des deux entités et au niveau du local pour agir et réguler leur fonctionnement. La dépendance entre les deux systèmes est primordiale pour comprendre qu'une nouvelle organisation de l'"espace terrien" est nécessaire et pour favoriser l'apparition d'un nouveau système énergétique compatible avec les équilibres de la biosphère. C'est dans cette perspective d'approche du tout et de ses par-

ties que nous devons nous situer.

Le paradigme planétaire renvoie à la notion de changement global. Cela ne signifie pas pour autant que les événements locaux sont de moindre importance puisqu'ils peuvent avoir des effets, avec des délais dans le temps, sur des espaces plus importants ; ils peuvent même s'accumuler sur différents espaces sans relation apparente, mais de telle façon que l'ensemble de ces perturbations locales, ponctuelles, constitue une menace au niveau global. C'est par exemple le cas de l'exploitation destructrice des forêts et de l'utilisation des véhicules terrestres avec les rejets de CO₂.

Le paradigme planétaire traduit une révolution des modes de penser des sociétés humaines, révolution amorcée dans les années 1970 avec l'essor de la conscience écologique. L'émergence de ce paradigme a pour base la naissance d'une véritable conscience planétaire, conscience convergente et unificatrice des désirs et ambitions humaines.

E. MORIN écrit : "C'est le principe fondamental de notre pensée qu'il faut changer maintenant. D'un côté, la pression de complexité des événements, l'urgence et l'ampleur du problème écologique nous poussent à changer nos pensées, mais il faut aussi qu'il y ait de notre part une poussée intérieure visant à modifier les principes mêmes de notre pensée".

Et d'ajouter : "Les problèmes fondamentaux sont planétaires, et une menace d'ordre planétaire plane désormais sur l'humanité. Nous devons penser en termes planétaires non seulement par rapport aux maux qui nous menacent mais aussi par rapport aux trésors écologiques, biologiques et culturels à sauvegarder (...). Plus rapidement et plus intensément que toutes les autres prises de conscience contemporaines, les prises de conscience écologiques nous entraînent à ne rien abstraire de l'horizon global, à tout penser dans la perspective planétaire" (1).

Les prémisses d'une conscience planétaire sont nées avec la conférence de STOCKHOLM sous l'égide des Nations Unies en 1972 (2). La prise en compte de l'appartenance de l'homme au monde fini et la conscience des limites imposées par ses relations avec l'environnement annoncent la nécessité de penser autrement le développement isolé des socié-

(1) E. MORIN, "La pensée écologisée", in E. MORIN, G. BOCCHI, M. CERUTI, *Un nouveau commencement*, Seuil, 1991, p. 189-190.

(2) Les principales préoccupations sont les pollutions, les impacts négatifs du développement industriel à l'échelle locale et régionale. C'est la voie de l'éco-développement qui est proposée. Cette démarche peut se résumer ainsi : elle s'appuie sur le principe de solidarité intergénérationnelle, sur le développement social en harmonie avec les principes écologiques et sur l'autonomie des décisions des sociétés humaines.

tés. Mais c'est véritablement à la fin de la dernière décennie que les problèmes globaux sont abordés et discutés par les scientifiques et le monde politique : souvenons-nous de l'année 1989, déclarée "année de l'environnement".

Deux années auparavant, le concept de "développement soutenable" éclairait les voies d'une nouvelle organisation de la planète où les rapports entre l'homme et la nature devraient être entièrement changés avec la prise en compte des principes d'équité intergénérationnelle et de conservation.

Il a fallu ainsi constater un certain nombre de dérèglements à l'échelle planétaire pour mobiliser la volonté d'organismes divers afin de comprendre les causes de tels dommages. Ainsi, de nombreuses actions concertées et de programmes pluri-disciplinaires ont-ils été mis en oeuvre (1). Parmi eux, nous pouvons mentionner le programme international géosphère-biosphère lancé en 1986, (IGBP ou "Geosphere-biosphere : a study of global change") qui a pour finalité la compréhension du système océan-atmosphère-biosphère dans sa totalité et à l'échelle globale. La prise en compte de la dimension humaine du changement global est à l'origine d'un programme de recherche en sciences sociales lancé en 1987 afin d'éclairer les causes humaines des modifications de l'environnement planétaire et de proposer des moyens d'action afin d'y remédier. Ce programme s'appelle "The Human Dimensions of Global Change : An International Programme on Human Interactions with the Earth" (HDGCP). Les programmes IGBP et HDGCP sont par ailleurs en relation étroite (2).

La pluralité des programmes de recherche traduit la nécessité "pressée" de connaître les modifications de l'environnement à l'échelle globale afin que la survie des espèces ne soit pas menacée à long terme. Les dimensions spatiale et temporelle sont donc bousculées. Le temps du monde fini n'est pas le temps de l'homme mais celui de l'humanité. L'évolution et la survie des espèces appartiennent au paradigme planétaire et ne peuvent être contenue sur une courte durée. La conscience planétaire traduit l'imbrication croissante et nécessaire des individus dans un environnement fini. Toute atteinte à l'environnement qui les englobe peut, à long terme, compromettre leur développement.

"Ainsi, nous avons besoin de la dépendance écologique pour pouvoir assurer notre indépendance" (3).

(1) *Le Courrier du CNRS*, Recherches sur l'environnement, p.106-113.

(2) I. BURTON et P. TIMMERMAN, "Les dimensions sociales des changements de l'environnement planétaire : responsabilités et possibilités", *RiSS*, Août 1989, n°121, p. 329-347.

(3) E. MORIN, op. cité, p. 185

Prochainement, un nouveau pas sera franchi avec le premier sommet planétaire, en Juin 1992 à RIO, sommet sur l'environnement et le développement (1). Les objectifs du respect de l'environnement et du développement économique sont désormais conçus comme des objectifs complémentaires avec la mise en application du "sustainable development".

La conséquence du changement d'échelle temporelle et spatiale des problèmes d'environnement est l'apparition nécessaire d'une organisation nouvelle de la planète, organisation ou structure qui pourrait mettre en oeuvre ce que l'OCDE a appelé la "globalisation mondiale". C'est à dire une action durable telle que son application à l'échelle locale soit en conformité avec les mécanismes régulateurs au niveau global. Pour y parvenir, l'instauration d'une nouvelle organisation dont les objectifs dépasseraient ceux, trop étroits, des Etats-nations pourrait constituer une voie possible. Aux yeux de A. JACQUARD, l'abandon d'une partie de la souveraineté des Etats au profit d'une telle organisation est une nécessité pour protéger les intérêts des habitants de la terre (2). Cette voie suppose que la conscience planétaire, soit porteuse d'un nouveau projet de société, de nouveaux désirs des hommes en communication avec la nature englobante.

C'est dans une certaine mesure la question que se pose A. COMOLET à propos de la large reconnaissance dont bénéficie l'écologie aujourd'hui (3). Cependant, si grâce à la prise de conscience planétaire, l'écologie s'est consolidée, en revanche elle n'implique pas une remise en cause de l'économie libérale. En effet, celle-ci a su s'adapter et "absorber en elle" les attributs de la "pensée écologisée". Pour l'auteur, il faut ainsi replacer l'écologie à sa juste place en considérant qu'elle permet au système libéral de "se refaire une santé". Son approche est de type environmentaliste en ce sens que les contraintes et limites imposées ne remettent pas en cause le fonctionnement du système capitaliste. L'objectif d'une telle démarche est de diminuer l'impact sur l'environnement des systèmes de production.

Cette approche s'oppose cependant à l'écologisme, selon la terminologie d'A. GORZ, appelée aussi écologie politique. Elle conduit à une remise en cause du système de production capitaliste et de sa logique d'accumulation. (4) L'écologisme implique un changement de paradigme : c'est le "moins mais mieux". Comme le démontre J. O'CONNOR, la logique capitaliste est incompatible avec celle des écosystèmes pour lesquels c'est l'auto-limi-

(1) M. BARRERE, "L'environnement dans le tourbillon du progrès", *Le Monde*, 18/12/1991, p. 12.

(2) A. JACQUARD, *Voici le temps du monde fini*, Seuil, 1991, p. 170-171.

(3) A. COMOLET, "Le renouveau écologique, de l'éco-utopie à l'éco-capitalisme", *Futuribles*, Septembre 1991, p. 52-54.

(4) A. GORZ, "L'écologisme comme anticapitalisme", *Problèmes économiques et sociaux*, n°651, mars 1991, p.42.

tation qui joue. (1)

Cela conduit tout naturellement à s'interroger sur un projet de société et donc sur un mode de développement compatible avec l'environnement naturel. L'écologie politique est ainsi une approche qui veut, compte tenu des critiques qu'elle formule sur la société actuelle, proposer un projet global de société. Le contenu de celui-ci s'appuie sur une combinaison originale des sphères marchande, étatique et autonome (négation des deux autres) : afin de satisfaire avant tout à un impératif de qualité de vie, la sphère autonome doit s'étendre au détriment des deux autres. Plus de temps est alors consacré aux activités socialement utiles, activités non rentables dans une logique de type capitaliste. (2)

L'écologisme du capitalisme avec le développement d'un véritable éco-business en répondant à des seuls critères de rentabilité accroît le flux de marchandises produites et amenuise les dotations terrestres de manière absolue : il détruit de manière accélérée les ressources de basse entropie. J-P DELEAGE écrit :

"La réalité de cette frontière écologique nous renvoie à la nécessité de dessiner une alternative sociale, qui dépasse la sécheresse du constat scientifique et implique des choix sociaux et politiques clairs, qui aillent bien au delà du "verdissement " du capitalisme". (3)

Et de conclure : "Il n'est plus d'autre solution pour les sociétés du XXème siècle que l'invention d'une démocratie sociale et écologique planétaire".

La nécessité de converger vers un structure capable de considérer le long terme et les interactions homme-biosphère afin de rendre compatible développement et environnement était déjà exprimé par K.E. BOULDING avec sa célèbre économie du vaisseau spatial terrestre. Toute la question est de définir la forme de cette institution à construire. (4)

Il apparaît que le respect des équilibres de la biosphère et de ses mécanismes régulateurs ne peut donc être laissé ni dans les mains des seuls Etats qui privilégient toujours leurs intérêts à court terme, ni abandonné aux libre cours d'une économie libérale. Une structure supra-nationale éco-planétaire où les intérêts de chacun d'eux seraient présents mais

(1) J. O'CONNOR, "Un développement soutenable du capitalisme est-il possible", *Ecologie politique*, n°1, hiver 1991-92, p.63-68.

(2) P. VAN PARIJS, *La pensée écologiste*, De Boeck université, 1991, p.137-155.

(3) J-P DELEAGE, "Ecologie : les nouvelles exigences théoriques", *Ecologie politique*, n°1, p.1-12.

(4) K. E. BOULDING, "Societal implications of man's increasing impact on the natural environment", in BOULDING K.E. et al., *Man and the biological revolution*, York university, Toronto, 1976, p.81-95.

soumis aux intérêts de la totalité pourrait constituer la voie d'une véritable stratégie de survie de la planète. La transition vers un système énergétique soutenable ne peut, sans cette volonté suprême, s'opérer sur la base exclusive des intérêts individuels.

De là à imaginer un gouvernement planétaire, il n'y a qu'un pas (1). Cependant, en restant en deçà, nous comprenons combien la difficulté de concilier le respect de l'environnement planétaire avec les intérêts égoïstes et étriqués de territoires nationaux indépendants.

Le Président A. SARNEY, ancien Président du Brésil, n'avait-il pas déclaré : "Nous ne tolérons pas que la communauté internationale nous dicte ce qu'il faut faire ou pas faire en Amazonie ... Je préférerais encore qu'elle soit un désert pourvu que ce soit un désert brésilien ...".

Nous sommes encore dans l'âge de fer planétaire" (2).

Tant que les décideurs politiques n'auront pas compris le sens et la portée de la conscience planétaire, il sera impossible de converger vers un nouvel "ordre". Ce nouvel "ordre" où la destruction est créatrice, où l'évolution entropique peut être maîtrisée et ralentie, où l'homme et la nature n'évoluent plus l'un sans l'autre ou contre l'autre, mais l'un et l'autre et l'un dans l'autre.

(1) J. THEYS, "Les décennies décisives", *Les Cahiers Français*, mars-avril 1991, p.128.

C'est la voie de la déclaration de la Haye : les pays signataires s'engagent dans le principe de la création d'une autorité planétaire dotée de compétences en matière de définition et de respect des normes.

(2) E. MORIN, "l'âge de fer planétaire", in E. MORIN, G. BOCCHI, M. CERUTI, *Un nouveau commencement*, Seuil, 1991, p. 18-24.

Conclusion du chapitre

L'évolution entropique peut être maîtrisée par le système énergétique à condition qu'il s'inscrive dans un paradigme planétaire au sein duquel peut s'opérer une véritable coévolution. Cette condition très forte implique alors inévitablement un changement dans la manière de gérer les ressources et de satisfaire aux équilibres de la biosphère : il faut penser globalement et agir localement .

A une stratégie de maîtrise de l'entropie correspond alors la nécessité de créer un nouvel ordre orienté par une conscience planétaire à travers une structure éco-planétaire qu'il reste à inventer.

CONCLUSION DE LA DEUXIEME PARTIE

Les enseignements que nous pouvons tirer de ce qui précède sont les suivants. D'une part, l'humanité dispose des moyens nécessaires pour s'acheminer vers un système énergétique soutenable. D'autre part, il existe des niveaux différents de développement qui peuvent constituer un blocage dans l'émergence d'un tel système. Il apparaît primordial de changer de paradigme et de considérer que le seul moyen d'oeuvrer à son émergence est d'adopter une régulation globale au coeur de laquelle réside la coévolution.

L'émergence d'une conscience planétaire est un préalable à celle du système énergétique soutenable. Elle implique de considérer avant tout les interdépendances des systèmes économiques et des systèmes écologiques au niveau global. L'espace national doit céder sa place à l'espace planétaire, espace physique englobant.

CONCLUSION GENERALE

Le développement des sociétés industrielles s'est accompagné d'un bouleversement de la structure du système énergétique, bouleversement basé sur le passage des convertisseurs naturels à des convertisseurs artificiels. Progressivement, la base renouvelable a laissé la place à la base non renouvelable dans les sociétés aujourd'hui développées. L'approche cyclique du système énergétique constitue une grille d'analyse qui permet d'appréhender la relation innovation-énergie au sein de la sphère économique. A l'apparition de chaque innovation radicale associée à un cycle économique, une source d'énergie particulière s'est imposée et a contribué à l'appauvrissement du système énergétique. Des quantités croissantes d'artefacts techniques se sont ainsi diffusés afin de parvenir à assouvir une soif d'énergie insatiable.

Mais la plus grande rupture apparaît avec le développement du mode de production capitaliste. Avec lui, le primat des énergies fossiles sur celui des énergies biologiques s'institue. L'apparition de la machine à vapeur et la consommation croissante de charbon qui en résulte dans les sociétés qui s'industrialisent au 19ème siècle, est à la base du développement du système capitaliste. Avec lui, les rapports de l'homme à la nature sont totalement transformés : "Le principe de la solidarité homme/univers physique a été remplacé par celui de la domination de la nature par l'homme". (1)

La logique expansive et productiviste du capital, base de la rationalité économique du système capitaliste, a destabilisé la rationalité écologique, rationalité fondée sur une logique d'autolimitation. Le système énergétique qui émerge est ainsi caractérisé par la domination des ressources fossiles, situation qui génère une inertie totale et une incapacité à répondre aux problèmes de la dégradation de la biosphère (diminution de la diversité et augmentation des rejets non assimilés par l'environnement). Ainsi, alors que les ressources renouvelables constituent la seule composante flux et est très abondante, elles ne satisfont que peu de besoins et demeurent marginalisées. (2) Le système énergétique privilégie la raréfaction constante et absolue de la composante fossile.

(1) J-P DELEAGE, *Histoire de l'écologie, une science de l'homme et de la nature*, La découverte, 1991, p.259.

(2) Il faut noter cependant que cette caractéristique est différente dans les pays en voie de développement où le système énergétique est à base essentiellement biologique et où la base fossile n'est entrée que tardivement.

La composition du patrimoine énergétique révèle en effet une grande diversité et une nature très hétérogène des dotations terrestres. Cependant, la mesure économique de ces richesses en fournit difficilement une lecture correcte. Le concept de réserve tend à surestimer les quantités de ressources à court terme et à occulter leur rareté tout comme leur raréfaction.

De plus, l'évaluation systématique des ressources en terme de tep laisse croire qu'il existe une substituabilité absolue entre ressources et qu'il suffit d'avoir du pétrole pour satisfaire tous les besoins.

En considérant les ressources énergétiques fossiles comme des biens quelconques, le système énergétique s'est alimenté de ressources qu'il n'a pu assimiler en totalité. Dès lors, l'environnement naturel dans lequel il s'insère lui est apparu comme un réceptacle commode au sein duquel quantités de rejets ont pu s'accumuler. Progressivement, les ressources énergétiques fossiles, non reproductibles, nécessaires au développement ont destabilisés les équilibres au sein des écosystèmes jusqu'à atteindre le niveau global en intervenant au sein de la biosphère. (perturbations des cycles biogéochimiques). Le système énergétique apparaît comme un agent fortement perturbateur de l'environnement naturel : les effets négatifs de l'exploitation exclusive des ressources fossiles peuvent être observés avec l'accumulation de rejets dans l'atmosphère (CO₂, SO₂, NO_x principalement).

Si il s'avère difficile de prévoir les conséquences et les menaces réelles de ces perturbations à l'échelle de la planète et à long terme (1), il est certain que la destabilisation de l'environnement naturel constitue une limite à l'utilisation des ressources non renouvelables, limite imposée par la biosphère. Autrement dit, la viabilité à long terme du système énergétique est compromise.

Ce constat semble d'ailleurs d'autant plus réaliste et probable si l'on prend en compte le développement des pays du tiers monde au cours du prochain siècle. Alors que les pays industrialisés ont opéré un découplage de la croissance économique et de la croissance énergétique, les pays en développement, sous l'effet d'une forte pression démographique - la stabilisation n'est prévue que pour la fin du 21^{ème} siècle - vont nécessairement observer une hausse de leur consommation énergétique pour la satisfaction de besoins croissants. D'ores et déjà, les ressources renouvelables dans ces pays ont du mal à satisfaire les besoins énergétiques élémentaires tandis que les ressources fossiles demeurent marginales.

(1) OCDE, *Le changement climatique, évaluation des retombées socio-économiques*, 1990, p.17-21.

Or, si l'accèsion à un stade de développement avancé ne peut s'opérer que sur le modèle des pays développés (utilisation massive des ressources fossiles et accumulation de rejets destabilisateurs des équilibres des écosystèmes et de la biosphère), il semblerait que toute tentative de développement durable soit vaine. Ainsi, "l'ultime limite du développement pourrait bien être celle imposée par la disponibilité de ressources énergétiques et par la capacité de la biosphère à supporter les sous-produits dégagés par l'utilisation de l'énergie". (1)

Nous constatons qu'il existe d'un côté des certitudes avec l'accroissement continu des émissions atmosphériques de CO₂, la raréfaction de la composante fossile, l'augmentation de la population des pressions exercées sur l'environnement pour la satisfaction des besoins d'énergie et d'un autre côté des incertitudes sur les effets à très long terme des rejets générés par les activités énergétiques à la fois au niveau local - régions, pays - et au niveau global.

Les enseignements de l'histoire du système énergétique nous ont montré que l'épuisement des ressources énergétiques fossiles et les effets de leur exploitation sur la biosphère ne sont perceptibles que sur une échelle de temps qui dépasse largement l'échelle humaine : l'accroissement de la teneur atmosphérique du CO₂ n'a été révélé qu'un siècle et demi après la Révolution Industrielle. Il faut en tenir compte pour l'avenir : le 21ème siècle sera celui du développement des pays du tiers monde, pays où la population représentera les 4/5 de la population mondiale dès 2020 !

Le problème posé ici est celui de l'adéquation des ressources aux besoins dans une perspective d'application de contraintes environnementales au sein du système énergétique. Il apparaît dès lors nécessaire de changer d'échelle de temps et de transgresser l'horizon temporel économique trop court afin d'allouer les ressources énergétiques dans le cadre d'une approche intergénérationnelle intégrant la relation énergie - biosphère. En effet, il est possible de se placer dans une optique dynamique de long terme et de ce fait gérer l'allocation des ressources entre les générations de manière compatible avec l'environnement naturel (compris ici comme offreur de ressources et assimilateur de déchets).

Pour y parvenir, nous avons montré que le recours à un valorimètre monétaire ne constitue pas un moyen efficace. De nombreuses limites apparaissent. Tout d'abord, le prix ne reflète pas la raréfaction de la ressource et donc ne peut prendre en compte des pénu-

(1) Commission mondiale sur l'environnement et le développement, *Notre avenir à tous*, Ed. du Fleuve, 1988, p.68.

ries futures. Comme il reflète le résultat d'une négociation d'acteurs dont la stratégie est l'appropriation de la rente, il ne peut allouer les ressources efficacement, d'autant plus que l'allocation se fait sans qu'il n'y ait aucune transaction avec les générations futures. Le valorimètre monétaire ne peut assurer la pérennité du patrimoine énergétique ni assurer la transmission des ressources entre les générations. La sphère marchande qui ne considère que les biens dont le prix est non nul ne se soucie pas des dégradations sans valeur monétaire résultant du recours aux ressources fossiles. A long terme, les dommages écologiques causés par ces ressources ne sont donc pas mesurés par le système de prix. De plus, la pratique courante de l'actualisation destinée à articuler des choix intertemporels, a pour effet de tronquer l'horizon temporel en le réduisant au temps de l'économie au sein duquel les changements globaux ne peuvent se manifester.

L'appréciation des ressources énergétiques par les seuls mécanismes de marché ne permet pas de gérer à long terme le patrimoine énergétique en respectant l'environnement naturel ni de respecter son intégrité et sa diversité.

Finalement, il est apparu qu'un principe essentiel n'appartenant pas à une telle logique peut satisfaire aux exigences des besoins intergénérationnels et aux exigences des équilibres naturels. Le principe de conservation est pour nous fondamental dans le cadre d'une approche globale du système énergétique au sein d'une perspective de très long terme. Dans un monde caractérisé par l'incertitude, la mise en oeuvre de ce principe doit conduire à une allocation efficace des ressources dans la mesure où il assure les trois fonctions : préservation du patrimoine énergétique, diminution des rejets et transmission intergénérationnelle. Il répond au souci d'équité et s'intègre totalement au patrimoine énergétique considéré comme un bien commun. En présence d'information croissante et d'incertitudes, ce principe conduit ainsi à favoriser les choix énergétiques les moins irréversibles (choix flexibles) afin de préserver les opportunités futures.

Quelques applications de ce principe en économie de l'environnement ont été réalisées dans le cadre de la théorie dynamique de la valeur d'option. Cette valeur de la flexibilité est ainsi associée au report de décisions irréversibles en incertitudes. Dans le cadre de choix énergétiques, l'existence d'une valeur de quasi-option, expression du regret maximal du décideur qui aurait retenu en début d'horizon l'option irréversible, permet de retenir la stratégie flexible.

Cependant, la difficulté d'évaluer correctement les bénéfices associés aux options en présence constitue une limite sévère à la mesure de la valeur d'option. Il apparaît souvent que les bénéfices associés à la préservation sont sous-évalués alors que ceux as-

sociés à l'exploitation - voire la destruction - du site naturel sont au contraire sur-évalués (1). Comment évaluer les bénéfices futurs associés à la préservation de la biodiversité tropicale ? Le principe de conservation accorde par ailleurs d'autres valeurs non révélées par le marché aux ressources à travers les valeurs de legs et d'existence ; là encore il est difficile de les mesurer correctement par le biais d'une valeur de marché.

Au coeur de la gestion intertemporelle des ressources énergétiques, la régulation doit donc être assurée par un principe éthique, le principe de conservation, et non par un système de prix qui ne tient compte ni de la dégradation de l'environnement naturel ni de la diminution de la variété du patrimoine énergétique.

L'adoption de ce principe porte en lui une légitimité qui, nous l'avons vu, n'est pas économique. Elle pourrait être totalement comprise dans le cadre de la thermodynamique (référence au premier principe appelé principe de conservation). Ainsi, un autre point central de notre travail est constitué par l'intégration des principes thermodynamiques au sein du système énergétique (principe de conservation, loi d'entropie relative à l'énergie, principe de dissipation relatif à la matière de Georgescu-Roegen). La révolution thermodynamique est le point de départ central d'une véritable unification des sciences humaines à travers les articulations nombreuses et les correspondances qui les relient. Les apports de cette science physique permettent de jeter un nouveau regard sur l'évolution du système énergétique que l'on pensait régulé par ses lois propres (lois du marché) et indépendante de celles qui régissent la biosphère. En réalité, les lois qui s'appliquent au vivant, à l'inanimé, à l'infiniment petit comme à l'infiniment grand sont les mêmes : les lois de la thermodynamique. Le système énergétique n'y échappe pas.

Le système énergétique est un système ouvert sur la biosphère avec laquelle il échange des flux d'énergie et de matière en permanence. Son évolution est orientée par la loi d'entropie qui s'applique à l'énergie et à la matière. La cohérence de sa structure interne - basse entropie - est maintenue au détriment d'une croissance continue de l'entropie de l'environnement.

La loi d'entropie permet d'apprécier la valeur des ressources énergétiques : ainsi, une ressource a une valeur économique seulement parce que son entropie est basse, mais la réciproque est fautive. Les déchets issus des activités énergétiques n'ont pas de valeur économique car ils sont caractérisés par une haute entropie.

(5) D.W. PEARCE, R.K. TURNER, *Economics of natural resources and the environment*, Harvester Wheat sheaf, 1990, p.313.

Les fondements de la valeur économique se situent donc dans la basse entropie de l'énergie et de la matière.

De plus, la loi d'entropie fournit une explication originale de la rareté et de la raréfaction des ressources. Seule une partie de l'énergie disponible ou potentielle peut être utilisée au moyen des technologies : c'est l'énergie accessible. Il existe donc une limite qui découle directement du second principe : le rendement thermodynamique étant toujours inférieur au rendement maximal théorique (rendement de Carnot), les quantités d'énergie et de matière de basse entropie accessible sont limitées. A terme, il y a donc bien raréfaction absolue des ressources de basse entropie. La rareté ne s'appuie donc pas sur une notion quantitative mais sur une notion qualitative : la basse entropie des ressources. La basse entropie est une ressource pour laquelle il n'existe aucun substitut.

L'exposé présenté par Faber, Niemes et Stephan relatif au processus d'extraction des ressources nous a montré combien la loi d'entropie était essentielle : en retenant un indicateur de la concentration de la ressource (concentration molaire), nous avons constaté que, au fur et à mesure que la concentration initiale diminuait sous l'effet de l'extraction, il fallait des quantités croissantes d'énergie pour extraire la ressource, ce qui impliquait un accroissement de l'entropie de l'environnement. Ainsi, l'utilisation des ressources énergétiques rares induit inéluctablement une baisse absolue du stock de basse entropie accessible.

L'approche entropique du système énergétique, système thermodynamique ouvert sur la biosphère, appartient à un paradigme d'essence organique et non mécanique. Ainsi, à côté des principes thermodynamiques, des principes écologiques régulent son fonctionnement. La conséquence de l'ouverture du système énergétique sur la biosphère traduit sa dépendance à l'égard des milieux physiques vivants - écosystèmes - et des milieux physiques inanimés - gisements de ressources énergétiques et minérales - lesquels sont contraints par les principes écologiques et thermodynamiques.

Les principes écologiques qui nous sont apparus essentiels sont la capacité de charge de l'environnement, l'efficacité énergétique (rendement des transformations), la loi de Liebig (notion de facteur limitant) et le principe de saturation (niveau optimum de disponibilité). Ils conditionnent la survie du système énergétique.

Les interactions nombreuses existant entre le système énergétique et la biosphère orientent leurs évolutions respectives, évolutions générées par des processus internes et externes de changement. Le rôle des feed-back amplificateurs provenant du système éner-

gétique s'est révélé être la cause essentielle de la perturbation des mécanismes de régulation au sein de la biosphère.

La prise en compte des principes écologiques dans le cadre d'une approche thermodynamique du système énergétique montre alors la nécessité de considérer les interdépendances évolutives entre le système et la biosphère. Au coeur de ces relations de réciprocité, c'est le règne de la coévolution. Le système énergétique évolue alors en phase avec la biosphère et les processus externes de changement qu'il génère doivent respecter les contraintes thermodynamiques et écologiques ; leur champ d'action est restreint.

Un nouveau système énergétique capable de participer à la maîtrise de l'évolution entropique de la biosphère peut alors émerger : c'est le système énergétique soutenable. Un tel système, intégrant les principes écologiques et thermodynamiques au niveau global, constitue une alternative souhaitable dans une perspective coévolutive de long terme. Il repose sur la mise en oeuvre du principe de conservation, principe garantissant une répartition intergénérationnelle équitable avec réduction des rejets, substitutions interénergétiques favorisant la base renouvelable, adoption de technologies à haut rendement énergétique et recyclage, et d'un autre principe de nature écologique : le principe de stabilité.

Ce principe essentiel est à la base d'un changement radical d'orientation du système énergétique. Au lieu de poursuivre sur la voie de la croissance continue des quantités d'énergie utilisées et de la destruction de la diversité, voie irréversible vers la dégradation du patrimoine énergétique et sans issue à long terme pour les générations futures, il devient primordial de doter le système énergétique d'une flexibilité d'adaptation (élasticité) en assurant une plus grande variété (préservation de son "capital biophysique") et donc une plus grande stabilité. Le principe de stabilité renforce ainsi la capacité homéostatique du système. La mise en oeuvre de ce principe doit s'opérer concrètement par le vecteur technologique. Autrement dit, il faut d'abord parvenir à une efficacité énergétique accrue - traduction de la diminution des pertes entropiques - dans la transformation des ressources comme dans le recyclage des déchets. L'approche exergique permet de mesurer les pertes entropiques relatives à l'énergie et à la matière et donc fournit une appréciation des possibilités de réduction du gaspillage de ressources.

Par ailleurs, la définition de champs de substituabilité, relativement à un usage énergétique particulier sur la base d'un potentiel technologique donné, permet de repérer les limites des substituabilités possibles des ressources rares de basse entropie par des ressources plus abondantes. Cela conduit à la constitution d'un gisement potentiel de maî-

trise énergétique (GPME).

Cependant, il est apparu que ce gisement était sous-exploité du fait de l'utilisation restreinte du potentiel technologique existant. En d'autres termes, la diffusion défailante des technologies des énergies renouvelables dans l'économie est une entrave majeure. Pour y remédier, il apparaît primordial que l'acteur public qu'est l'Etat intervienne à travers ses délégations propres ou/et par le biais de représentations extérieures (OCDE, Commission des communautés européennes ...) tout au long du processus de création/diffusion des technologies. Il faut néanmoins que son intervention soit constitutive d'une stratégie d'innovations afin qu'il assure l'émergence, l'accumulation et la diffusion des technologies. Ainsi, une identification préalable des actions à mener en fonction de l'état des réseaux technico-économiques comme c'est le cas en France avec l'ex-Agence française pour la Maîtrise de l'Energie, traduit la volonté de converger vers une meilleure efficacité du financement public dans le but de satisfaire à une véritable maîtrise de l'énergie. L'émergence d'une telle stratégie active peut être toutefois contrariée par le processus de sélection des technologies dans la mesure où un choix fige le progrès technique en le localisant sur une technologie particulière (effet de "lock-in"). En présence de rendement croissant d'adoption, il importe de se garder de tout choix "pressé" compte tenu des incertitudes relatives au développement potentiel des technologies concurrentes. Ainsi, l'intervention publique au niveau du processus de création/diffusion des technologies peut contribuer à une meilleure exploitation du GPME.

Compte tenu des incertitudes relatives aux technologies ainsi qu'aux changements de la biosphère, il est essentiel d'assurer une flexibilité d'adaptation du système énergétique en diversifiant et développant le potentiel technologique. Il est donc possible de reconsidérer le système énergétique et le potentiel technologique existant afin d'entrevoir des stratégies de maîtrise de l'évolution entropique de la biosphère. L'analyse de scénarios énergétiques futurs s'appuyant sur un "développement soutenable" nous a montré que la maîtrise des consommations énergétiques est possible avec l'amélioration de l'efficacité énergétique (exploitation du gisement d'économie d'énergie) ainsi qu'avec la diminution des consommations d'énergie fossile induisant la baisse des rejets atmosphériques (exploitation du gisement de substitution).

Dans une optique dynamique, on peut considérer que le GPME est sous-estimé puisqu'il n'intègre pas le potentiel technologique futur. Il faut noter en effet que le GPME n'est pas figé dans le temps et que, sous l'effet du progrès technique, il se renouvelle en permanence. Il est donc important de mettre en oeuvre des stratégies énergétiques globales

de très long terme afin de prendre en compte les effets du progrès technique sur le GPME et poursuivre ainsi le développement soutenable des sociétés. Cette perspective a été exposée à travers l'idée d'un nouveau système énergétique intégré (NIES) développé au sein de l'IASA. Ce système au sein duquel les imputs sont décomposés en produits propres (intégration des ressources) autorise, en élevant le ratio hydrogène/carbone, à la fois la diminution des rejets, un meilleur usage des ressources ainsi que l'amélioration de son élasticité et de son efficacité exergetique.

L'intégration des ressources énergétiques comme le développement des ressources renouvelables traduit la nécessité de s'acheminer vers un nouveau système énergétique soutenable. Pour converger vers un tel système, il est nécessaire de s'appuyer sur une régulation active de la biosphère. Cette régulation peut s'opérer par l'emploi d'instruments réglementaires et économiques. La norme doit jouer un rôle prépondérant compte tenu d'une part des difficultés d'une évaluation correcte des services vitaux et d'autre part afin d'assurer l'équité intergénérationnelle dans le cadre du principe de conservation (réglementation visant à limiter l'usage des ressources fossiles).

Mais cela n'exclut pas de recourir à l'emploi d'instruments économiques tels la fiscalité (taxes sur les émissions de CO₂) et la création de marchés de droits à polluer négociables. Une perspective intéressante est apparue avec la notion de globalisation mondiale qui implique l'absence de toute réduction uniforme des émissions et la préférence pour une réduction différenciée selon les pays avec la possibilité de compléter le système de marchés de droit d'émissions avec le principe d'une compensation des émissions. La globalisation mondiale autorise le respect des équilibres de la biosphère (fixation d'un niveau d'émissions totales au niveau global) en s'appuyant sur des stratégies différenciées de limitation des émissions dont l'ensemble des pays détermine les modalités d'application (choix des moyens). La globalisation mondiale permet de plus de reconsidérer le problème de la relation développement/environnement dans les pays du tiers monde. Des mécanismes de transferts originaux des ressources des pays industrialisés vers les pays en développement doivent être imaginés afin d'éviter que leur développement ne compromette l'émergence d'un système énergétique soutenable. Cela suppose de leur donner les moyens de participer à l'augmentation de la flexibilité du système énergétique ainsi qu'à une régulation globale active.

A l'évidence, la préservation de l'environnement ne constitue pas une priorité pour ces pays dont le poids de la dette est très lourd (1). Afin que développement et environne-

(1) Banque mondiale, *Rapport sur le développement dans le monde, le défi du développement*, 1991.

ment puisse jouer la complémentarité, il faut alors leur permettre de bénéficier des technologies les plus performantes en matière d'économie d'énergie afin de réduire les consommations d'énergie et le taux de croissance des émissions de CO₂ notamment (1).

Il importe à nos yeux que l'accès à un stade de développement avancé de ces pays au cours du prochain siècle ne soit pas découplé de la préservation de l'environnement naturel. Le cas échéant, il s'avèrerait impossible d'évoluer vers un système énergétique soutenable. Ainsi, un tel système ne peut naître de lui-même mais nécessite une stratégie de sélection des choix à tous les niveaux.

Dans un contexte d'information croissante et en présence d'incertitudes, les choix ouvrant la voie d'un système énergétique soutenable doivent s'inscrire dans une transition dotée d'une grande flexibilité. Les caractéristiques de cette transition sont la multitude des sentiers d'évolution possibles conduisant à un changement structurel du système (émergence d'une nouvelle structure dissipative). Cet état de stabilité final peut intervenir au terme d'une transition dont la maîtrise est difficile en raison des perturbations - ou fluctuations - aléatoires qui interviennent au sein du système en des points instables - ou points de bifurcation.

Les sentiers d'évolution contiennent ainsi à la fois les ruptures structurelles générées par l'amplification de fluctuations locales au delà de points instables et l'émergence de nouvelles structures successives résultant de la propagation des fluctuations dans tout le système. Il existe aussi une discontinuité dans l'évolution du système énergétique, ce qui implique des ruptures d'organisation. Ces ruptures participent à l'instabilité du système pendant toute la durée de la période de transition. Celle-ci constitue une étape importante dans l'évolution de la structure du système, étape au cours de laquelle il est instable car les processus de changement internes et externes sont perturbés par des fluctuations locales. Ces fluctuations sont donc essentielles pour l'émergence d'un sys-

(1) J. BENHAIM, A. CARON, F. LEVARLET, *Analyse économique des propositions et stratégies développées par les acteurs publics et privés nationaux et internationaux face au problème du CO₂*, Cahiers du centre Economie, espace, environnement, Paris I, 1991, p.148.

Un exemple de mécanisme de financement possible des transferts technologiques est constitué par le tiers payant. Ce système permet de favoriser les investissements économes en énergies. Opus cité, p.255.

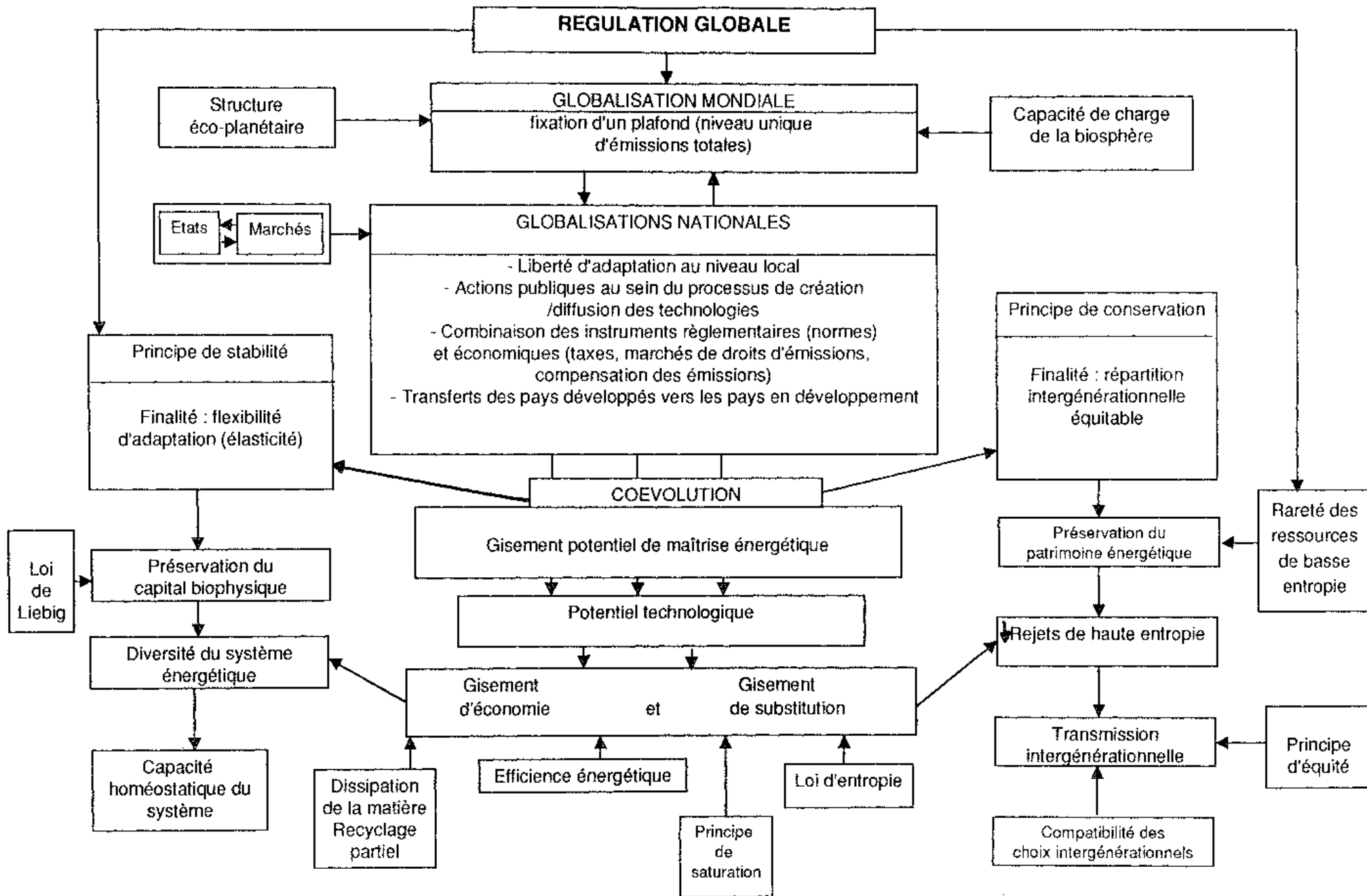
Un autre système original pourrait se développer : il s'agit du système des échanges dette-nature. La dette est alors convertie en investissement écologique dans le pays débiteur. S. FAUCHEUX, J-F NOEL *Les menaces globales sur l'environnement*, La découverte, 1990, p.112-113. et OCDE, *L'état de l'environnement*, 1991, p.298.

tème énergétique soutenable : l'état final (nouvelle structure) ne peut apparaître que si elles s'amplifient dans tout le système. Une nouvelle structure dissipative stable et dépendantes des fluctuations émerge alors. Cette structure stable est caractérisée par une grande flexibilité d'adaptation (capacité homéostatique) : sous l'effet des fluctuations, le système énergétique s'est enrichi - accumulation de l'information au sein du vecteur technologique -, sa variété s'est accrue. Dans la mesure où l'attracteur n'est pas unique, le système dit multistable est doté d'une plus grande élasticité. La résultante de cette évolution est la complexification du système énergétique. L'exploitation du GPME joue donc un rôle stratégique dans l'apparition d'un tel système : il permet le ralentissement de l'entropie globale.

Enfin, un autre point intéressant mérite réflexion. La recherche d'une transition flexible conduisant à un système énergétique soutenable doit nécessairement s'accompagner d'un changement de paradigme. Le paradigme planétaire autorise une approche nouvelle du biosystème dans la mesure où il prend en compte les interdépendances évolutives du système énergétique et de la biosphère - coévolution - dans la gestion des ressources et dans le développement des sociétés au sein d'un environnement fini.

Nous ne pensons pas qu'il soit possible de construire un système énergétique soutenable sans s'appuyer sur une approche globale nous permettant de prendre conscience des interrelations mutuelles existant entre les différents éléments physiques et biologiques, ainsi que de l'imbrication croissante des systèmes économiques et écologiques. Un tel système énergétique n'est donc possible que si une conscience planétaire émerge : la perspective planétaire apparaît comme un changement des modes de penser incontournable. Il est donc nécessaire de changer d'échelle pour mettre en oeuvre une régulation globale. Nous pouvons résumer par un schéma récapitulatif le cadre de la régulation globale.

Les modalités d'application d'une régulation globale pose le problème de la nécessité d'une structure éco-planétaire et de ses articulations avec les différents Etats. Une telle organisation devrait permettre d'harmoniser les politiques des Etats en matière de réduction des émissions en leur accordant une liberté totale dans les moyens à employer (fiscalité, normes ...) au niveau local pour satisfaire un objectif global. Sachant qu'il existe un risque au niveau des décisions des Etats indépendants de compromission des objectifs d'équité intergénérationnelle dans la transmission des ressources et de respect de l'environnement naturel, il apparaît primordial d'oeuvrer à la création d'une structure éco-planétaire dotée d'une conscience planétaire - donc au dessus de la souveraineté des



Etats - destinée à orienter les actions au niveau local afin que la régulation du tout ne soit pas compromise. La finalité d'une telle structure serait donc de garantir le développement soutenable des sociétés à long terme : elle dépasserait donc les intérêts de court terme des décideurs politiques et économiques et devrait être totalement indépendante des Etats. Compte tenu des difficultés rencontrées dans la mise en oeuvre d'une politique de l'environnement efficace au sein de nombreux pays, elle permettrait de compenser les défaillances des acteurs publics (1).

Cependant, il convient d'être prudent. Il ne faut pas que sous prétexte de gérer la planète, la rationalité écologique serve l'ambition d'un pouvoir mondial centralisateur totalitaire envers lequel aucun contrôle démocratique ne pourrait exister. La question du pilotage du vaisseau spatial terrestre, selon l'expression de K.E. BOULDING, pilotage nécessaire, mérite une réflexion approfondie. Nous ne prétendons pas apporter une réponse à cette question mais simplement montrer combien elle est essentielle pour aboutir à un système énergétique soutenable, système s'inscrivant dans un nouveau développement des sociétés.

Comme l'exprime E. MORIN, nous devons bâtir nos aspirations sur une conscience planétaire seule capable de nous arracher de l'âge de fer planétaire où nous sommes en-crés.

"La terre ne nous appartient pas, nous lui appartenons. Nous sommes apparemment devenus ses souverains. Nous sommes en réalité réciproquement souverains l'un de l'autre. Il s'agit aujourd'hui de contrôler le développement incontrôlé de notre ère planétaire. La terre patrie est en danger. Nous sommes en danger, et l'ennemi, nous pouvons enfin l'apprendre aujourd'hui, n'est autre que nous-mêmes".

E. MORIN, l'âge de fer planétaire.

BIBLIOGRAPHIE

OUVRAGES

- Agence Française pour la Maîtrise de l'Energie, *Maîtrise de l'énergie et recherche : quel bilan? Quel avenir?*, La documentation française, 1986
- Agence Française pour la Maîtrise de l'Energie, *Biomasse, énergie et environnement*, Service agriculture bois biomasse, brochure n° 1309, 1991.
- ALINHAC M., *Actualisation et système de prix en économie énergétique*, CNRS, Collection "Energie et Société", 1980.
- ALPHANDERY P., BITOUN P., DUPONT Y., *la sensibilité écologique en France*, Problèmes politiques et sociaux n° 651, la Documentation française, Mars 1991.
- AMSTERDAMSKI S. et al., *La querelle du déterminisme*, Le Débat, Gallimard, 1990.
- ANGELIER J-P, *La rente pétrolière*, CNRS, collection Energie et Société, 1976.
- ARACIL J., *Introduction à la dynamique des systèmes*, Presses universitaires de Lyon, 1984.
- ARENA R., BENZONI L., ROMANI P-L, *Traité d'économie industrielle*, Collection économie, Economica, 1988.
- ACOT P., *Histoire de l'écologie*, PUF, 1988.
- ATKINS P.W., *Chaleur et désordre, le second principe de la thermodynamique*, Pour la Science, Ed. Belin, 1987.
- ATLAN H., *Entre le cristal et la fumée, essai sur l'organisation du vivant*, Editions du Seuil, 1979.
- BANQUE MONDIALE, *Rapport sur le développement dans le monde*, Le défi du développement, 1991.
- BARBET P., *Les énergies nouvelles*, Edition La Découverte/Maspéro, 1983.
- BARDE J.Ph., GERELLI E., *Economie et politique de l'environnement*, PUF, 1977.
- BARRE R., GODET M., *Les nouvelles frontières de l'environnement*, Economica, 1982.
- BEAUD M., *L'art de la thèse*, Ed. La Découverte, 1985.

- BENHAIM J., CARON A., LEVARLET F., *Analyse économique des propositions et stratégies développées par les acteurs publics et privés nationaux et internationaux face au problème du CO2*, Cahiers du Centre Economie, Espace, Environnement, Paris I, Octobre 1991.
- BOREL L., *Thermodynamique et énergétique*, volume 1, Presses polytechniques et universitaires romandes, 3ème édition, 1991.
- BORY C., *La thermodynamique*, Que sais-je?, PUF, 1981.
- BOULDING K.E. et al., *Man and the biological revolution*, York University. Toronto, 1976.
- BOURRELIER P-H., DIETRICH R., *Le mobile et la planète ou l'enjeu des ressources naturelles*, Economica , 1989.
- BRANA P., *Maîtriser l'énergie, un enjeu des années 90*, la documentation française, Collection des rapports officiels, Juin 1989.
- BROWN L.R. et al., *L'état de la planète*, Economica, 1991, trad.de State of the World, World watch Institute, 1991.
- CARON F., *Le résistible déclin des sociétés industrielles*, Librairie Académique Perrin. 1985.
- CHESNAIS J.C., *La population du monde, de l'Antiquité à 2050*, BORDAS, 1991.
- CHEVALIER J-M., BARBET P., BENZONI L., *Economie de l'énergie*, Dalloz. 1986.
- CLARK C.W., *Mathematical bioeconomics, the optimal management of renewable resources*, John Wiley and Sons, 1976.
- CLARK W.C., MUNN R.E., *Sustainable development of the biosphere*, International Institute for Applied Systems Analysis -IIASA-, Laxenburg, Austria, Cambridge University Press, 1986.
- CNRS, *Sadi Carnot et l'essor de la thermodynamique*, Ed. du CNRS, 1976.
- CNRS/CPE, *Atlas mondial de l'énergie, abondance apparente mais déséquilibres profonds*, Aditech, août 1989.
- COHENDET P., LLERENA P. et al., *Flexibilité, information et décision*, Economica, 1989.
- Commissariat Général du Plan, *La diffusion des innovations technologiques*, Etudes et recherches n°1, juillet 1985.
- Commission des Communautés Européennes, *L'Europe de la Technologie*, 10-89, déc.1988.

- Commission des Communautés Européennes, *Energy in Europe, energy for a new century : the European perspective*, Special issue, July 1990.
- Commission Mondiale sur l'environnement et le développement, *Notre avenir à tous*, Ed. du Fleuve, Montréal, 1988. Trad.de Our Common Future, Oxford University Press, 1987.
- Communautés Européennes, *L'Europe et les nouvelles technologies*, Comité économique et social, 1988.
- Conférence Mondiale de l'Energie, *Energie, besoins, espoirs*, Synthèse des travaux, 13ème Congrès, Cannes, 1986.
- Conférence Mondiale de l'Energie, *l'Energie demain*, Tables rondes, 14ème Congrès, Montréal, 1989.
- CRIME D., *Biomasse et production d'énergie : methode d'analyse économique des investissements. Application au biogaz*. Notes et Documents n°13, INRA Grignon, 1986.
- CRIQUE P., *L'énergie solaire en France, approche socio-économique*, CNRS, collection Energie et Société, 1980.
- DAJOZ R., *Précis d'écologie*, Dunod. 1971.
- DALY H.E., UMANA A.F., *Energy, economics and the environment, conflicting views of an essential interrelationship*, AAAS selected Symposium, 64. 1981.
- DASGUPTA P.S., HEAL G.M., *Economic theory and exhaustible resources*, Cambridge University Press, 1979.
- DASMANN R.F., MILTON J.P., FREEMAN P.H., *Ecological principles for economic development*, Ed. John Wiley and sons LTD, 1973.
- DAVID S. LANDES, *L'Europe technicienne - Révolution technique et libre essor industriel en Europe Occidentale de 1750 à nos jours*, Gallimard. 1969.
- DEBEIR J-C., DELEAGE J-B., HEMERY D., *Les servitudes de la puissance, une histoire de l'énergie*, Flammarion, 1986.
- DE GENNES P-G. et al., *L'Ordre du chaos*, Pour la Science, Ed. Belin, 1989.
- DELEAGE J.P., *Histoire de l'écologie, une science de l'homme et de la nature*, Ed. la Découverte, 1991.
- DE MONTBRIAL T., *Le désordre économique mondial*, Calmann-Lévy, 1974.
- DE ROOSE F., VAN PARIJS P., *La pensée écologiste*, De Boeck Université, 1991.
- DE ROSNAY J., *Le microscope*, vers une vision globale, Seuil, 1975.

DEROUSSEAU J., *L'évolution économique et le comportement industriel*, Dunod, 1986.

DESSUS B., *Incertitudes et promesses technologiques à long terme dans le domaine énergétique*, Communication personnelle, 1989.

DESSUS B., *Ressources et réserves d'énergie renouvelable : tentative d'approche cartographique et quantitative*, Communication au séminaire "Prospective des déséquilibres mondiaux", 06.02.1989.

DESSUS B., DEVIN B., PHARABOD F., *Le potentiel mondial des énergies renouvelables*, Jouve, 1991.

Direction Générale de l'Energie et des Matières Premières, *Les perspectives énergétiques de la France à l'horizon 2000*, Avril 1987.

DRYZEK J.S., *Rational ecology*, Basil Blackwell Inc., 1987.

DUBOS R., *Courtisons la terre*, Stock, 1980.

DUMON R., *Economies et conversions d'énergie*, Masson, 1978.

ESQUISSAUD P., *Ecologie industrielle*, Hermann, 1990.

L'Evaluation économique de la Recherche et du changement technique, sous la direction de J. DE BANDT, D. FORAY, Ed. du CNRS, 1991.

FABER M., NIEMES H., STEPHAN G., *Entropy, environment and resources. And essay in physico-economics*, Springer-Verlag, second edition, 1987.

FAUCHEUX S., *L'articulation des évolutions monétaire et énergétique en économie*, Thèse de doctorat en Sciences Economiques, Université de Paris I, avril 1990.

FAUCHEUX S., NOEL J-F., *Les menaces globales sur l'environnement*, Ed. La Découverte, 1990.

FERRARI S., *Etude technico-économique d'un procédé d'estérification des huiles végétales avec le méthanol ou l'éthanol destiné à produire un carburant pour moteurs diesel*, rapport pour l'ANVAR, projet APIES, Avril 1989.

FERICELLI J., LESOURD J-B., *Energie : modélisation et économétrie*, Economica, 1985.

FLAMAND F-X, *Approvisionnement d'une usine de production d'A-B-E à partir de biomasse lignocellulosique. Etude des gisements et coûts : cas de la région Centre*, Notes et Documents n°1, INRA Grignon, novembre 1984.

FORESTER J.W., *Industrial Dynamics*, Cambridge, MIT Press, 1961.

FREEMAN C., *The economics of industrial innovation*, 2nd édition 1982, London.

- FRISCH R., *Abondance énergétique, mythe ou réalité?, avenir des tensions sur les ressources énergétiques : le projet A.T.R.E*, Technip, Cannes 1986.
- GAUDET G., LASSERRE P., *Ressources naturelles et théorie économique*, Presses de l'Université de Laval, Québec, 1986.
- GEORGESCU-ROEGEN N., *The Entropy Law an The Economic Process*, Harvard University Press. 1971.
- GEORGESCU-ROEGEN N., *Energy and Economic Myths*, Pergamon Press. 1976.
- GIARINI O., LOUBERGE H., *La civilisation technicienne à la dérive*, Dunod, 1979.
- GILLE B., *Histoire des techniques*, Encyclopédie de la Pléiade. Gallimard, 1978.
- GOOL W.VAN. et al, *Energy and time in the economic and physical sciences*, Elsevier Science Publishers B.V., 1985.
- GUITTON H., *Le sens de la durée*, Calmann-Lévy, 1985.
- HICKS J.R., WEBER W., *Carl Menger and the Austrian School of Economics*, Oxford University Press, 1973.
- INSEE, *Les Comptes du patrimoine naturel*, n°137-138, Commission interministérielle des comptes du patrimoine naturel, décembre 1986.
- JACQUARD A., *Voici le temps du monde fini*, Ed. du Seuil, 1991.
- JANET C., REYNAUD A., *Bilan des valorisations énergétiques de biomasse en France. Du projet de développements agricoles aux réalisations industrielles*, Laboratoire d'économie et sociologie rurales, INRA, Grenoble, octobre 1985.
- JUNQUEIRA LOPES Rui M.E., *L'Economie des Ressources Renouvelables*, Economica. 1985.
- KNEESE A.V., SWEENEY J.L., *Handbook of natural resource and energy economics*, Elsevier science publishers B.V., volume 1, 1985.
- KRUTILLA J.V., FISHER A.C., *The economics of natural environments*, Johns Hopkins University Press, 1975.
- LAFFONT J-J., *Effets externes et Théorie économique*, CNRS. 1977.
- LEBEAU A., *L'espace en héritage*, Seuil, 1986.
- LE GOFF P., *Energétique industrielle, analyse thermodynamique et mécanique des économies d'énergie*, tome1, Ed. Technique et documentation, 1979.

- LE GOFF P., *Energétique industrielle, analyse et optimisation des procédés*, tome 2. Ed. Technique et documentation, 1980.
- LEONTIEF W., *Une étude de l'ONU sur l'économie mondiale future*, Dunod 1977.
- LESOURNE J., *Techniques économiques et gestion industrielle*, Dunod, 1965.
- LESOURNE J., *Economie de l'ordre et du désordre*, Economica, 1991.
- LIEBARD A., PHILIBERT C., RODOT M., *Du neuf sous le soleil, énergie et environnement*, Calmann--Lévy/Systèmes Solaires, 1991.
- LOVELOCK J.E., *La terre est un être vivant, l'hypothèse Gaïa*, Ed. du Rocher, 1986, Trad. de Gaïa, a new look at life on earth, J.E LOVELOCK, 1979.
- MARTIN J.-M., *L'Economie mondiale de l'énergie*, Ed. La découverte, 1990.
- MASSE P., *Le choix des investissements*, Dunod, 1968.
- MAYER S., *Parti pris pour l'écologie*, Messidor / Ed. Sociales, 1990.
- MEADE James E., *The Theory of Economic Externalities*, Sidjthoff Leiden, 1973.
- MEADOWS D.L. and coll, *The limits to growth*, Potomac Associates, Universe Books, New York, 1972.
- MEYER F., *La surchauffe de la croissance, essai sur la dynamique de l'évolution*, Collection écologie, FAYARD, 1974.
- Ministère de l'Industrie et du Commerce extérieur, DGEMP, *Les chiffres clés de l'énergie*, Dunod, 1992.
- MIROWSKI P., *More heat than light*, Cambridge University Press, 1989.
- MONOD J., *Le hasard et la nécessité*, Seuil, 1970.
- MORIN E., BOCCHI G., CERUTI M., *Un nouveau commencement*, Seuil, 1991.
- MORIN E., *La Méthode*, Tome 1, la nature de la nature, Ed. du Seuil, 1977.
- MORIN E., *La Méthode*, Tome 2, La vie de la vie, Ed. du Seuil, 1980.
- MORIN E., *La Méthode*, Tome 3, La connaissance de la connaissance, Ed. du Seuil, 1986.
- MUNGALL C., MCLAREN D.J., *La terre en péril, métamorphose d'une planète*, Presses de l'université d'Ottawa, 1990.
- NOEL J.F., *Les modèles économiques néo-classiques du développement durable*, Cahiers du Centre Economie, Espace, Environnement, n° 96, Avril 1991.

- NOEL J.F., *Les Indicateurs éco-énergétiques*, Cahiers du Centre Economie, Espace, Environnement, Paris I, n° 97, Décembre 1991.
- OCDE, *Un système de comptabilité des ressources, l'expérience norvégienne*, OCDE, 1980.
- OCDE, *Politique de l'environnement et changement technique*, OCDE, 1985.
- OCDE, *Instruments économiques pour la protection de l'environnement*, OCDE, 1989.
- OCDE, *Le changement climatique, Evaluation des retombées socio-économiques*, OCDE, 1990.
- OCDE, *Parer au changement climatique : quelques problèmes économiques*, OCDE, 1991.
- OCDE, *Politique de l'environnement : comment appliquer les instruments économiques*, OCDE, 1991.
- OCDE, *Ressources naturelles renouvelables, incitations économiques pour une meilleure gestion*, OCDE, 1989.
- OCDE/AIE, *Les perspectives énergétiques mondiales*, OCDE, 1982.
- OCDE, *L'industrie pétrochimique*, 1985.
- OCDE/AIE, *Perspectives du gaz naturel*, OCDE, 1986.
- OCDE/AIE, *Sources d'énergie renouvelables*, OCDE, 1987.
- OCDE, *Energie et environnement, Méthodes d'analyses des relations à long terme*, 1979.
- OCDE/AIE, *Politiques et programmes énergétiques des pays de l'AIE*, OCDE, 1987.
- OCDE/AIE, *Technologie du charbon propre, programmes et perspectives*, OCDE, 1987.
- OCDE, *Uranium, ressources production et demande*, OCDE, Mars 1988.
- OCDE/AIE, *Energy technologies for reducing emissions of greenhouse gases*, Proceedings of an experts'seminar, Paris, 12th - 14th April 1989, 2 volumes.
- OCDE, *Ressources naturelles renouvelables, incitation économique pour une meilleure gestion*, 1989.
- OCDE/AIE, *L'Energie et l'environnement : vue d'ensemble des politiques*, OCDE, 1990.
- OCDE, *L'Etat de l'environnement*, OCDE, 1991.
- OCDE, *Indicateurs d'environnement*, OCDE, 1991.
- ODUM E.P., *Fundamentals of ecology*, Saunders, 1971.

- ODUM H.T., *Environment, Power and Society*, Wiley-Interscience, 1971.
- ODUM E.P., *Ecologie*, Deuxième édition, 1976.
- PASSET R., *L'Economie et le Vivant*, Collection "Traces" chez Payot, 1979.
- PASSET R., *L'économie de l'environnement naturel et de la biosphère*, Cahiers du Centre Economie, Espace, Environnement, Paris I, n° 84, Décembre 1989.
- PEARCE D.W., TURNER R.K., *Economics of natural resources and the environment*, Harvester Wheatsheaf, 1990.
- PERCEBOIS J., *Economie de l'énergie*, Economica, 1989.
- PERRINGS C., *Economy and environment, a theoretical essay on the interdependence of economic and environmental systems*, Cambridge University Press, 1987.
- PERROT C., *Energie et matières premières*, Bréal, 1986.
- PILLET G., MUROTA T. et al., *Environmental economics, the analysis of a major interface*, Roland Leimgruber, 1987.
- PRIGOGINE I., *Introduction à la thermodynamique des processus irréversibles*, Dunod, 1968.
- PRIGOGINE I., STENGERS I., *La nouvelle alliance*, Gallimard, 1980.
- PRIGOGINE I., STENGERS I., *Entre le temps et l'éternité*, Fayard, 1988.
- PUISIEUX L., RADANNE P., *L'énergie dans l'économie*, Syros. Alternatives économiques, 1989.
- RAMADE F., *Eléments d'écologie appliquée, action de l'homme sur la biosphère*, Ed. Mc Graw-Hill, 1976, seconde édition.
- RAMADE F., *Ecologie des ressources naturelles*, Masson, 1981.
- RAMADE F., *Eléments d'écologie, Ecologie fondamentale*, Ed. Mc Graw-Hill, 1984.
- RAMADE F., *Les catastrophes écologiques*, Mc Graw-Hill, 1987.
- RAMAIN P., *Réflexions critiques sur les bilans énergétiques*, CNRS. Collection Energie et Société, 1977.
- RIFKIN J., *Entropy a new world view*, The viking Press, New-York, 1980.
- ROUBAN L., *L'Etat et la science*, Ed. du CNRS, 1988.
- ROY B., *Algèbre moderne et Théorie des Graphes orientées vers les sciences économiques et sociales*, Dunod, 1969.

- RUELLE D., *Hasard et chaos*, Ed. Odile JACOB, 1991.
- SAINT-PAUL R., TENIERE-BUCHOT P-F., *Innovation et Evaluation technologiques - Sélection des projets, méthodes de prévision*, Entreprise Moderne d'Édition, 1974.
- SALOMON J.-J., SCHMEDER G., *Les enjeux du changement technologique*, Economica, 1986.
- SALOMON J.-J., REEVES H., STENGERS I., PASSET R., *Du cosmos à l'homme, comprendre la complexité*, Cahier de l'université de Pau et des pays de l'Adour, Groupe de réflexions transdisciplinaires, l'Harmattan, 1991.
- SAMUELSON P.A., *Les fondements de l'analyse économique*, Deuxième édition. Dunod, 1971. 2 tomes.
- SESSI, *L'industrie et l'énergie en 1987, principaux résultats de l'enquête annuelle*.
- SIMON J.L., *L'homme, notre dernière chance*, PUF, 1981.
- TERNISIEN J.A. et al., *Dictionnaire usuel de l'environnement et de l'écologie*, Guy Le Prat, 2 tomes, 1981.
- TERNISIEN J.A., *L'absolu, ses réalités humaines. Les aspects scientifiques, philosophiques et sociologiques de l'environnement*, Conseil International de la Langue Française, 1989.
- TERRE VIVE, *Quelles énergies pour demain ?* n° 1, Septembre 1991.
- The economist, *les chiffres du monde en poche*, Presses de la fondation nationale des sciences politiques, 1992.
- THOM R., *Modèles mathématiques de la morphogénèse*, Christian Bourgeois éditeur, 1980.
- TONNELAT J., *Thermodynamique et biologie*, Maloine ed., Deux volumes- 1977/78.
- VAN GOOL N. and al., *Energy and time in the economic and physical sciences*, Elsevier science publishers B.V., 1985.
- VON BERTALANFFY L., *Théorie générale des systèmes*, Dunod, 1973.
- WALTERS C., *Adaptive management of renewable resources*, Mac Millan Publishing Company, 1986.
- WATT K.E.F., *Principles of environmental Science*, Mc Graw-Hill, 1973.

ARTICLES

AILLERET P., "Equivalences énergétiques en l'an 2000, la fin des tec et des tep", *Revue française de l'énergie*, novembre 1972, p.53-55.

AILLERET P., "Les erreurs auxquelles peuvent donner lieu les équivalences énergétiques entre formes différentes d'énergie", *Revue de l'énergie*, n°337, septembre 1981, p.417-421.

AMIGUES J-P., "L'effet d'irréversibilité en économie de l'environnement", *Cahiers d'économie et sociologie rurales*, n°4, avril 1987, p.98-112.

ANDERSSON T., "Government failure - the cause of global environmental mismanagement", *Ecological economics*, 4, 1991, p; 215-236.

ARROW K.J., FISHER A.C., "Environmental preservation, uncertainty and irreversibility", *Quarterly journal of economics*, may 1974, n°2, p.312-19.

ARTHUR B., "Competing technologies, increasing returns and lock-in by historical events", *The Economic journal*, march 1989, p.116-131.

AVEROUS C., "L'environnement en Europe : état et perspectives", *Futuribles*, juin 1985, p.3-22.

AVEROUS C., "OCDE : le bilan mitigé des politiques d'environnement depuis 20 ans", *Les Cahiers français*, Mars-Avril 1991, p. 77-81.

AYRES R. U., KNEESE A., "Production, consumption and externalities", *American economic review*, june 1969, p.282-296.

AYRES R.U., Self-organisation in biology and economics, *Research report*, IIASA, January 1988.

AYRES R.U., "Le métabolisme industriel et les changements de l'environnement planétaire", *Revue internationale des sciences sociales*, 121, août 1989, p.401-412.

BAIROCH P., "Energie et Révolution Industrielle : nouvelles perspectives", *Revue de l'énergie*, n° spécial "Energie et développement", 356, août-septembre 1983,p.399-407.

BANDELIER M., JOLY A., The impact of new technologies on the environment, *Working paper*, IIASA, n°43, mai 1988.

BARANZINI A., PILLET G., "Procédure d'évaluation de la part de l'environnement dans un produit économique", *Economie appliquée*, tome XLI, n°1, 1988, p.129-150.

- BARBET P., "La théorie des prix de l'énergie dans la pensée économique : une recension", *Economies et Sociétés*, série EN, n° 1, 1983, p. 1809-1834.
- BARDE J-P., TENIERE-BUCHOT P-F., "Les technologies propres : illusions et réalités", *Futuribles*, novembre 1988, p.51-60.
- BARRERE M., "L'environnement dans le tourbillon du progrès", *Le Monde*, 18-12-1991, p. 12.
- BARSOTTI A. et al., "The final uses of energy in Italy 1970-1987", Conférence Mondiale de l'Énergie, *L'énergie demain*, 1989.
- BEAUD M., "Risques planétaires, environnement et développement", *Economie et Humanisme*, n° 308, Juillet-Août 1989, p. 6-15.
- BELYAEV L.S. et al., Ways of transition to clean energy use : 2 methodological approaches, *Working paper*, IIASA, n°15, January 1987.
- BENHAMOU G., "CO2 : les chercheurs font les comptes", *Science et avenir*, Mars 1990, p. 28-31.
- BENHAMOU G., "L'or noir du grand bleu", *Science et avenir*, Janvier 1990, p. 50-55.
- BENNETT L.L., MARQUES DE SOUZA J.A., "Nuclear power for environment protection", Conférence Mondiale de l'Énergie, *L'énergie demain*, 1989.
- BENZONIL, LEVEAU C., "La formation des prix de l'énergie : essai sur la dynamique du système énergétique", *Economies et Sociétés*, Série EN, n° 1, 1983, p. 1869-1926.
- BERNANKE B., "Irreversibility, uncertainty, and cyclical investment", *Quarterly journal of economics*, february 1983, p.85-106.
- BERTHELEMY JC., DEVEZEAUX JG., "L'impact des chocs pétroliers. Une simulation rétrospective 1973-1982", *Revue économique*, n°3, mai 1987, p.877-896.
- BERTHELEMY JC., DEVEZEAUX JG., "Le modèle MELODIE : un modèle énergétique de long terme pour l'économie française", *Revue d'économie politique*, vol.97, n°5, septembre 1987, p.877-896.
- BOCEHI G., CERUTI M., "Les nouveaux jeux planétaires", in E. MORIN, G. BOCCHI, M. CERUTI, *Un nouveau commencement*, Seuil, 1991, p. 159-178
- BOITEUX M., "A propos de la critique de la théorie de l'actualisation telle qu'employée en France", *Revue d'économie politique*, septembre-octobre 1976, n°5, p.828-831.
- BONDUELLE A., "Cogénération : pour un couple moderne", *Reporterre*, Octobre 1989, p. 24-25.

- BONDUELLE A., "Chaleur-force, le couple de l'année", *Systèmes solaires*, Janvier-Février 1989, p. 53-57.
- BORDES G., "Théorie des phénomènes externes et biens pseudo-libres", *Economies et sociétés*, série F, n°25, septembre 1973, p.1555-1611.
- BOREL L., "La comptabilité exergetique, fondement de l'économie énergétique", *Revue SE-BES*, octobre 1991, p.19-27.
- BORLIN M., "Economic-environmental input-output models", *Energie et Environnement, Méthodes d'analyses des relations à long terme*, OCDE, 1974, p. 107-129.
- BOUDEVILLE J.R., "La gestion de l'environnement", *Revue économique du Sud-Ouest*, IERSO, n°1, 1973, p.13-34.
- BOULDING K., "The economics of energy", *The annals of the American Academy*, vol. 410, november 1973, p.124-
- BOURGUINAT H., "L'économiste et l'environnement : propos liminaires", *Economies et sociétés*, série F, n°25, septembre 1973, p.1513-1537.
- BOURGUINAT H., POINT P., "Environnement et choix énergétiques", *Revue d'économie politique*, n°2, "L'énergie", mars-avril 1975, p.275-314.
- BOUVET J., "Pour une société plus efficace, énergie et information : le grand confluent", Conférence Mondiale de l'Energie, *l'énergie demain*, 1989.
- BRYANT J., "A thermodynamics approach to economics", *Energy economics*, january 1982, p.36-50.
- BURTON I., TIMMERMAN P., "Les dimensions sociales des changements de l'environnement : responsabilités et possibilités", *Revue internationale des sciences sociales*, 121, août 1989, p.329-347.
- Cahiers de l'Institut de Sciences Mathématiques et Economiques Appliquées (ISMEA)*, Les prix de l'énergie, série EN n°1, 1983.
- CALLON M., "l'Etat face à l'innovation technique. Le cas du véhicule électrique", *Revue française de science politique*, vol.29, n°3, 1979, p.426-447.
- CALLON M., LAREDO P., RABEHARISOA V., "Des instruments pour la gestion et l'évaluation des programmes technologiques : le cas de l'AFME", in J.DE BANDT, D. FORAY, *l'évaluation économique de la recherche et du changement technique*, 1991, p. 301-330.

- CALLON M., LAREDO P., RABEHARISOA V., "Des instruments pour la gestion et l'évaluation des programmes technologiques : le cas de l'AFME", in *l'évaluation économique de la recherche et du changement technique*, sous la direction de J.DE BANDT et D.FORAY, 1991, Ed. du CNRS, p. 301-331.
- CAMPAN E., *Aspects physiques, économiques et juridiques de l'exploitation des ressources non renouvelables*, rapport technique n° 8814, GREMAQ, Décembre 1988, Université de TOULOUSE I.
- CHARTIER P., "Recherche technologique, énergie et environnement", *Le Monde*, 17 octobre 1990.
- CHARTIER P., et al., "Le biogaz : état actuel et perspectives de développement", Conférence Mondiale de l'Énergie, *Energie, Besoins, Espoirs*, 1986, p. 1-24.
- CHARTIER P., MOISAN F., "Progrès technologique et amélioration des consommations spécifiques", Conférence Mondiale de l'Énergie, *L'énergie demain*, 1989.
- CHARTIER P., "La biomasse : des chocs pétroliers à l'effet de série", *Futuribles*, Octobre 1991, p. 37-62.
- CHARTIER P. et al., "Le défi de l'effet de série : l'efficacité énergétique est-elle une réponse ?", in OCDE/AIE, *Energy technologies for reducing emissions of greenhouse gases*, Vol.1, 1989, p. 115-129.
- CHENGXIAN L., "The up-to-date state and the future development of biogas construction in China", Conférence Mondiale de l'Énergie, *Energie, Besoins, Espoirs*, 1986.
- CHEVALIER J.M., "Éléments théoriques d'introduction à l'économie du pétrole : l'analyse du rapport de force", *Revue d'économie politique*, mars-avril 1975, n°2, p.230-256.
- CHEVALIER J.M., "Les prix de l'énergie au futur", *Economies et sociétés*, série EN, n° 1, 1983, p. 2089-2107.
- CIPOLLA C., "Sources d'énergie et histoire de l'humanité", *Annales ESC*, n°3, mai-juin 1961, p.521-534.
- CLARK C.W., MUNRO G.R., "Renewable resource management and extinction", *Journal of environmental economics and management*, 1978-5, p.198-205.
- CLARK C.W., CLARKE F.H., MUNRO G.R., "The optimal exploitation of renewable resource stocks : problems of irreversible investment", *Econometrica*, vol.47, n°1, January 1979, p.25-47.
- CLARK C.W., "L'écologie humaine et les changements de l'environnement planétaire", *Revue internationale des sciences sociales*, 121, août 1989, p.349-382.

CLARK W.C., "Sustainable development of the biosphere : themes for a research program", in W.C. CLARK et R.E. MUNN, *Sustainable development of the biosphere*, IIASA, Luxembourg, Austria, 1986, p. 5-48.

CNRS, *Le courrier du CNRS*, "Recherches sur l'environnement", mai 1989.

COHENDET P., FITOUSSI J-P, HERAUD J-A., "Ressources naturelles et irréversibilité", *Revue d'économie politique*, n°3, 1979, p.379-388.

Commissariat Général du Plan, "Energie : perspectives technologiques", *Problèmes Economiques*, n° 2-250, 20-11-1991, p. 4-11.

COMOLET A., "Le réchauffement global de la planète", *Futuribles*, février 1988, p.3-18.

COMOLET A., "Le renouveau écologique, de l'éco-utopie à l'éco-capitalisme", *Futuribles*, Septembre 1991, p. 41-54.

COOMBS R.W., "Innovation, automation and the long-wave theory", *Futures*, vol.13, n°5, 1981, p.360-70.

COSTANZA R., "Embodied energy, energy analysis and economics", in H.E. DALY, UHANA A.F., *Energy, economics and the environment*, Conflicting views of an essential interrelationship, AAAS Selected Symposium, 1981, p. 119-145.

CRABBE P., "Valeurs d'option et de quasi-option des ressources naturelles", in G. GAUDET et P. LASSERRE, *Ressources naturelles et théorie économique*, 1986, p. 254-278.

CROSSON P., "Agricultural development looking to the future", in W.C. CLARK, R.E. MUNN, *Sustainable development of the biosphere*, 1986, p. 105-136.

CUMBERLAND J.H., "Un modèle concernant les relations économiques de l'environnement", *Revue économique du Sud-Ouest*, IERSO, n°1, 1973, p.35-50.

CUMBERLAND J.H., "Energy, environment and social science research priorities", *Energie et Environnement, Méthodes d'analyse des relations à long terme*, OCDE, 1974, p. 2-38.

DALY H., "On economics as a life science", *Journal of political economy*, vol. 76, n°3, may-june 1968, p.392-406.

DALY H., GOODLAND R.J.A., "Les instruments requis", in C. MUNGALL, D.J. MCLAREN, *La terre en péril*, Presses de l'Université d'Ottawa, 1990, p. 295-312.

DALY H.E., "The economics of the steady state", *American economic review*, may 1974, vol. 64, n°2, p.15-21.

DALY H.E., "Toward some operational principles of sustainable development", *Ecological Economics*, 2, 1990, p. 1-6.

DARMSTADTER J., "Energy patterns - in retrospect and prospect", in W.C. CLARK, R.E. MUNN, *Sustainable development of the biosphere*, IIASA, Laxemburg, Austria, 1986, p. 140-168.

DASGUPTA P., STIGLITZ J., "Resource depletion under technological uncertainty", *Econometrica*, vol.49, January 1981, p.85-104.

DAYAL M., SOOHA G.D., "Relevance of non-conventional energy sources to the socio economic situation in India", Conférence Mondiale de l'Énergie, *Energie, Besoins, Espoirs*, 1986.

Décision environnement, numéro 2, Janvier 1992.

DE JOUVENEL B., "Les économistes et l'environnement", *Analyse et prévision*, Tome XIII, 1972, p. 53-75.

DEIMEZIS N., "Quel avenir énergétique pour l'Europe ?", *Futuribles*, Juillet-Août 1991, p. 45-56.

DE LA GRANDVILLE O., "Capital theory, optimal growth, and efficiency conditions with exhaustible resources", *Econometrica*, vol.48, n°7, novembre 1980

DELEAGE J-P., "Maîtriser l'énergie pour un monde équitable", *Revue SEBES*, octobre 1991, p.13-18.

DELEAGE J.P., "L'homme et l'énergie au cours des âges", *Les Cahiers Français*, n° 236, Mai-Juin 1988, p. 9-10.

DE MONTGOLFIER J., "Gestion du patrimoine et gestion négociée des forêts européennes", in OCDE, *Ressources naturelles renouvelables*, 1989, p. 117-124.

DESAIGUES B., POINT P., "L'économie du patrimoine naturel : quelques développements récents", *Revue d'économie politique*, 100, n° 6, Novembre-Décembre 1990, p. 707-785.

DESAIGUES B., POINT P., "Les méthodes de détermination d'indicateurs de valeur ayant la dimension des prix pour les composantes du patrimoine naturel", *Revue économique*, n° 2, Mars 1990, p. 269-319.

DESHMUKH S.D., PLISKA S.R., "Optimal consumption and exploration of non renewable resources under uncertainty", *Econometrica*, vol.48, n°1, January 1980, p.177-200.

DESPRAIRIES P-C., BOY DE LA TOUR X., LACOUR J-J., "La mobilisation progressive des ressources pétrolières, facteur de hausse modérée des prix", *Revue de l'énergie*, n°367, octobre 1984, p.627-642.

DESSUS B., "Les promesses des énergies renouvelables", *La recherche*, octobre 1989, p.1282-1289.

DESSUS B., "Energie-développement-environnement, un enjeu planétaire au 21ème siècle", *Revue de l'énergie*, n°415, novembre 1989,p.978-992.

DESSUS B., "Modernes éoliennes", *Le Monde*, 12.09.89.

DESSUS B., PHARABOD F., "Jérémie et Noé : deux scénarios énergétiques mondiaux à long terme", *Revue de l'énergie*, n°421, juin 1990,p.291-307.

DESSUS B., "Les réserves d'économie d'énergie : nature, caractéristiques et coûts d'accès", *Revue de l'énergie*, n° 431, Juin 1991, p. 388-396.

DEVEZEAUX et al., "Le modèle macro-énergétique MIEL", *Revue générale nucléaire*, n°2, mars-avril 1984, p.166-180.

DEVEZEAUX de LAVERGNE J-S, LADOUX N., "Pourquoi des modèles macro-énergétiques ?", *Revue de l'énergie*, n°411, mai 1989, p.423-434.

DUHAMEL B., "La prépondérance des combustibles ligneux et la planification énergétique dans les pays du tiers monde", Conférence Mondiale de l'Energie, *Energie, Besoins, Espoir*, 1986.

DUMONT R., "Halte au massacre", *Science et avenir*, n° 78, hors série, 1990, p. 18-20.
Ecologie politique, n° 1, Janvier 1992.

Economie et humanisme, Les risques planétaires, juillet-août 1989.

Economies et Sociétés, *Cahiers de l'ISHEA*, Tarification et organisation du système énergétique, série EN, n° 4, 1990.

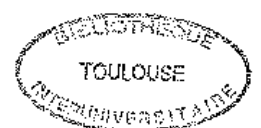
Economies et Sociétés, *Cahiers de l'ISMEA*, série EN, n° 4, 1988.

Entropie, Deuxièmes journées de la thermodynamique contemporaine, n° 164/165, 1991.

FABER M., "A biophysical approach to the economy, entropy, environment and resources", in VAN GOOL W., BRUGGINK J.J.C, *Energy and time in the economic and physical sciences*, Elsevier Science Publishers B.V, 1985, p. 315-337.

FAUCHEUX S, "Le coût des pollutions globales", *Economie et humanisme*, n° 308, Juillet-Août 1989, p. 62-66.

FEDERWISCH J, DUBOIS Th, TISSOT E, "Comparaison de bilans énergétiques", in J. FERICELLI, J.B LESOURD, *Energie : modélisation et économétrie*, Economica, 1985, p. 381-416.



FISHER A.C., KRUTILLA J.V., CICHETTI C.J., "The economics of environmental preservation : a theoretical and empirical analysis", *American economic review*, vol.62, n°4, september 1972, p.605-619.

FISHER A.C., KRUTILLA J.V., "Valuing long run ecological consequences and irreversibilities", *Journal of environmental economics and management*, 1974-1, p.96-108.

FISCHER A.C, KRUTILLA J.V, "Economics of nature preservation", *Hand book of natural resource and energy economics*, 1985, p. 165-189.

FISHER A, KRUTILLA J.V, "Economics of nature preservation", in KNEESE A.V, SWEENEY J.L, *Handbook of natural resource and energy economics*, 1985, p. 165-188.

FORAY D., "Les modèles de compétition technologique. Une revue de la littérature", *Revue d'économie industrielle*, n°48, deuxième trimestre 1989, p.16-34.

FOWLER T.K, "Fusion power : expected environmental characteristics and status of Rand D", in OCDE/AIE, *Energy technologies for reducing emissions of greenhouse gases*, vol.2, 1989, p. 607-620.

FRASER W.L, "Low cost environmental control technologies for coal utilization", Conférence Mondiale de l'énergie, *L'énergie demain*, 1989.

FREIXAS X., "L'effet d'irréversibilité dans le choix de grands projets", *Revue économique*, janvier 1987, vol.38, n°1, p.149-155.

GALLOPIN G.C., GUTMAN P., MALETTA H., "Appauvrissement à l'échelle du globe, développement durable et environnement : une perspective théorique", *Revue internationale des sciences sociales*, 121, août 1989, p.413-437.

GEORGESCU-ROEGEN N, "Energy, matter and economic valuation : where do we stand?", in H.E DALY, UMANA A.F, *Energy, economics and the environment, conflicting views of an essential interrelationship*, AAAS Selected Symposium, 64, 1981, p. 43-79.

GEORGESCU-ROEGEN N, "Feasible recipes versus viable technologies", *Atlantic Economic Journal*, vol.12, 1984, p. 21-31.

GIRAUD P, Noël, "France : énergie 2010", *Futuribles*, Juillet-Août 1991, p. 57-61.

GIRAUD P.N, "Les cercles vertueux du pétrole", *Le Monde*, 25-06-1991, p. 23.

GODARD O, "Environnement, modes de coordination et systèmes de légitimité : analyse de la catégorie de patrimoine naturel", *Revue économique*, Mars 1990, vol.41, n° 2, p. 215-241.

- GOLDEMBERG et al., "An end-use oriented global energy, strategy", *Annual review of energy*, vol. 10, 1985,p.613-688.
- GORZ A., "L'écologisme come anticapitalisme", *Problèmes politiques et sociaux*, n°651, mars 1991, p.42-43.
- GREENLEY D.A, WALSH R.G, YOUNG R.A, "Option value : empirical evidence from a case study of recreation and water quality", *Quartely Journal of Economics*, vol.96, November 1981, n° 4, p. 657-673.
- GRILICHES Z., "Hybrid corn : an exploration in the economics to technological change", *Econometrica*, 1957, p.167-190.
- GRINEVALD J., "L'effet de serre de la biosphère, de la révolution thermo-industrielle à l'écologie globale", *Revue SEBES*. mai 1990,p.9-34.
- GRINEVALD J., "Note sur le terme biosphère", *SEBES*, octobre 1991, p.61-62.
- GUILLEMIN C., "Matières premières minérales et énergétiques : quels enjeux ?", *Futuribles*, juillet-août 1985, p.3-38.
- GUITTON H., "Monde fini ou monde infini", *Revue des deux mondes*, avril 1983, p.61-67.
- HAFELE W, "La solution nucléaire", *Pour la science*, Novembre 1990, n° 157, p. 110-118.
- HAFELE W, SCOTT D.S, "The coming hydrogen age : freventing world climatic disruption", Conférence Mondiale de l'Energie, *l'énergie demain*, 1989.
- HAFELE W, et al., "Novel integstated energy systems : the case of zero emissions", in W.C CLARK, R.E MUNN, *Sustainable development of the biosphere*, IIASA, 1986, p. 171-194.
- HEIERLI U., "Bilans énergétiques et développement ", *Les temps modernes*, août-septembre 1975,p.279-308.
- HENRY G., "Option values in the economics of irreplaceable Assets", *Review of economic studies*, Symposium on the Economics of exhaustible resources, 1974,p.89-104.
- HENRY C., "Investment decisions under uncertainty : the "irreversibility effects"", *American economic review*, december 1974, vol.64, n°6, p.1006-1012.
- HENRY J., "Equilibrium as a process", *Economie appliquée*, tome XL, n°3, 1987,p.463-482.
- HENRY C, "Efficacité économique et impératifs éthiques : l'environnement en copropriété", *Revue Economique*, n° 2, Mars 1990, vol.41, p. 195-214.
- HOLLING C.S, "The resilience of terrestrial ecosystems : local surprise and global change", in W.C CLARK, R.E MUNN, *Sustainable development of the biosphere*, IIASA, 1986, p. 292-317

- HOLLING C.S, BOCKING S, "L'imprévu, une occasion à saisir au bond", in C. MUNGALL, D.V MCLAREN, *La terre en péril*, 1990, p. 313-330.
- HOPE T.et al., "Integrated gasification combined cycle power generation using an advanced cal gasification process", Conférence Mondiale de l'Energie, *L'énergie demain*, 1989.
- HOUGHTON R.A., WOODWELL G.M., "Global climatic change", *Scientific american*, avril 1989, vol.260, n°4, p.18-26.
- HOURCADE J-C, MEGIE G., THEYS J., "Politiques énergétiques et risques climatiques, comment gérer l'incertitude ?", *Futuribles*, septembre 1989, p.35-60.
- HOURCADE J.C, MEGIE G, THEYS J, "Le bouleversement des climats, comment gérer l'incertitude", *Futuribles*, Mai 1989, p. 3-19.
- HOURCADE et al., "Modifications climatiques et réorientation des politiques énergétiques : comment gérer l'incertitude ?", Conférence Mondiale de l'Energie, *L'énergie demain*, 1989.
- HOURCADE J.C, BARON R, "Traitement de l'innovation et évaluation des coûts à long terme de la réduction des émissions de CO₂", *Revue de l'Energie*, n° 427, Janvier 1991, p. 42-53.
- HUBLER J, KISS M, "decentralized medium size cogeneration plants", Conférence Mondiale de l'Energie, *L'Energie demain*, 1989.
- KAWAMIYA N, "Thermophysical analysis of resource substitutions, technological developments and the environmental problems in their interrelation", in G. PILLET, T. MUROTA, *Environmental economics*, 1987, p. 37-51.
- KEAN J, "Select use of gas : a key to environmental quality control", Conférence Mondiale de l'Energie, *Energie, Besoins, Espoirs*, 1986.
- KELLER W.K.F, "The gas and steam combined cycle", Conférence Mondiale de l'Energie, *L'énergie demain*, 1989.
- KEYUN D. et al., "One way to tackle the rural energy problem in China", Conférence Mondiale de l'Energie, *Energie, Besoins, Espoirs*, 1986.
- KNIZIA K, SIMON M, "Coal-fired combined cycle plants and high-temperature reactors for energy supply of tomorrow", Conférence Mondiale de l'Energie, *L'énergie demain*, 1989.
- KNUDSEN J.E, RICKEN J.H, "Development of Danish Combined heat and power systems", Conférence Mondiale de l'Energie, *L'énergie demain*, 1989.
- KONDRATIEN N.D, "The long waves in economic life", *Review Spring*, 1979, 4, p. 543.

KRUTILLA J.V., "Conservation reconsidered", *American economic review*, vol.LVII, n°4, september 1967, p.777-786.

JOLY A, BANDELIER M, The impact of new technologies on the environment, *Working paper*, IIASA, May 1988.

LAMBERT G., "Modèle de décision avec information endogène : application aux investissements énergétiques", *Evolutions économiques et théories de l'information*, BETA/CNRS, mars 1987.

LAMBERT G., "Choix d'investissements : un nouvel outil de décision", *Revue française de gestion*, mars-avril-mai 1988, p.20-35.

LAMBERT G, "La bi-énergie comme adaptation de l'appareil productif aux incertitudes énergétiques : la flexibilité amont", in P.COHENDET et al., *Flexibilité, information et décision*, 1989, p. 235-256.

LAPONCHE B., "Une conception globale de la politique de maîtrise de l'énergie", *Revue de l'énergie*, n°404, juillet-août 1988,p.491-497.

La Recherche, La Science du désordre, n°232, mai 1991.

LEBRETON P., "Logiques du vivant", *Revue SEBES*, novembre 1990,p.11-14.

Le Monde, "La CEE propose au douze une taxe sur l'énergie", 27-09-1991, p. 38.

Le Monde, "Le grand spectacle du pétrole", 29-11-1989.

LEONTIEF W., "Environmental repercussions and the economic structure. An input-output approach", *Review of economics and statistics*, august 1970, 52, p.262-71.

LEONTIEF W., "Structure of the world economy, outline of a simple input-ouput formulation", *American economic review*, december 1974, p.823-834.

LEPRINCE P. et al., "Comment calculer le contenu énergétique des produits d'origine pétrolière et leurs substituts d'origine charbonnière ou végétale, application au carburant", *Revue d'économie industrielle*, n° 18, 4ème trimestre 1987, p. 124-132.

LESOURD J-B, GOUSTY Y., "Bases économique et thermodynamique des techniques de comptabilité de l'énergie", *Revue d'économie industrielle*, n°15,1981, p.44-59.

Les Cahiers Français, L'énergie, La documentation française, n°236, Mai-Juin 1988.

Les Cahiers Français, Environnement et gestion de la planète, la documentation française, n°250, mars-avril 1991.

LESOURNE J, "L'état des recherches sur l'ordre et le désordre en micro-économie", *Economie appliquée*, tome XLII, 1989, n° 3, p. 11-39.

Les Réalités de l'écologie, n° 27, Janvier 1992.

LOUBERGE H., "Note sur l'économie politique du patrimoine", *Revue d'économie politique*, n°1, 1982, p.71-79.

LUCAS J., "Filières pour la biomasse énergétique", BTMEA, n° 15-16, Mars-Avril 1987, CEMAGREF, p. 45-49.

MAILLARD D., "L'élasticité énergie PIB, sophisme ou panacée", *Economies et sociétés*, série EN, n° 1, 1983, p. 1835-1846.

MAINI J.S., "La forêt : baromètre de l'environnement et de l'économie", in C. MUNGALL, D.J MCLAREN, *La terre en péril*, presses de l'Université d'Ottawa, 1990, p. 184-205.

MARCHETTI C., "Recession 1983 : ten more years to go ?", *Technological forecasting and social change*, 24, 1983, p. 331-342.

MARCHETTI C., "How to solve the CO2 problem without tears", in OCDE/AIE, *Energy technologies for reducing emissions of greenhouse gases*, 1989, vol. 1, p. 161-191.

MARTIN J-M., "L'avenir du marché pétrolier", *Futuribles*, juin 1988, p.35-54.

MARTIN J-M., "L'intensité énergétique de l'activité économique dans les pays industrialisés : les évolutions de très long terme livrent-elles des enseignements utiles ?", *Economies et sociétés*, série EN, n°4, 1988, p.9-27.

MARTIN J-M., "Energie et changement technologique : les enseignements des quinze dernières années", *Problèmes économiques*, n°2191, 19.09.90, p.17-26.

MARTIN J-M., "Une crise peut en cacher une autre", *Le Monde*, 11 décembre 1990.

MARTIN J.M., "Energie et environnement", *Les Cahiers Français*, Mai-Juin 1988, n° 236, p. 58.

MAURUS V., J-P TUQUOI, "L'OPEP", *Le Monde*, 18.02.92, p.37.

MEALLIER A., "A chaque âge de l'humanité ses énergies", *Futuribles*, avril 1985, p.3-21.

MEGIE G., "Changement de la composition chimique de l'atmosphère et effet de retard", *Economie et humanisme*, Juillet-Août 1989, p. 31-35.

MINTZER I., "A warming world : challenges for policy analysis", *Economic Impact*, 1988/4, n°65, p.6-12.

MIROWSKI P., "Energy and energetics in economic theory : a review essay", *Journal of economic issues*, vol.XXII, n°3, september 1988, p.811-830.

- MOLGA P., "Le solaire renaît dans l'espace", *Science et Avenir*, n°535, septembre 1991, p.78-82.
- MORGENSTERN R.D., "Towards a comprehensive approach to global climate change mitigation", *The american economic review*, papers and proceedings, vol. 81, n° 2, May 1991, p. 140-145.
- MORIN E., "La pensée écologisée", in E. MORIN, G. BOCCHI, M. CERUTI, *Un nouveau commencement*, Seuil, 1991, p. 179-193.
- MORIN E., "L'âge de fer planétaire", in E. MORIN, G. BOCCHI, M. CERUTI, *Un nouveau commencement*, Seuil, 1991, p. 18-24.
- NAKICENOVIC N., Dynamics of change and long waves, *Working paper*, n°74, IIASA, june 1988.
- NICOLIS C., "Le climat peut-il basculer ?", *La recherche*, La science du désordre, Mai 1991, p. 584-587.
- NORDHAUS W.D., "The allocation of energy resources", *Brooking papers on economic activity*, 3, p.529-570.
- NORDHAUS W.D., "A sketch of the economics of the greenhouse effect", *The american economic review*, papers and proceedings, vol. 81, n° 2, May 1991, p. 146-150.
- NORDHAUS W.D., "Count before you leap", *The Economist*, July 1990, vol. 316, p. 19-22.
- O'CONNOR M., "Entropy, structure and organisational change", *Ecological economics*, vol. 3, n° 2, July 1991, p. 95-122.
- OUTREQUIN P., "Approche macro-économique du contenu énergétique", in P. LE GOFF, *Energétique industrielle*, tome 2, 1980, p. 201-224.
- ORFEUIL J-P., "Prix et consommation de carburants dans les transports routiers de voyageurs", *Revue de l'énergie*, n°421, juin1990,p.308-316.
- ORFEUIL J-P., "Transports, énergie, environnement : le scénario Prométhée", *Futuribles*, novembre 90, p.27-54.
- PARANT A., "Les perspectives démographiques mondiales", *Futuribles*, mars 1990,p.49-78.
- PASSET R.et al., Une approche multi-disciplinaire de l'environnement, *Cahiers du centre de recherche Panthéon-Sorbonne*, série économique, n°2, Economica, 1980.
- PASSET R., "La thermodynamique d'un monde vivant ; des structures dissipatives à l'économie", *Futuribles*, décembre 1980, p.2-25.

- PASSET R., "Prévision à long terme et mutation des systèmes économiques", *Revue d'économie politique*, n°5, 1987, p.532-555.
- PASSET R., "Les approches économiques de l'environnement", *Les Cahiers Français*, n°250, mars-avril 1991, p.45-55.
- PASSET R., "La "crise" économique dans le courant de l'évolution", in SALOMON J-J, et al., *Du cosmos à l'homme, comprendre la complexité*, L'Harmattan, 1991, p.49-75.
- PEARCE D.W, "La gestion des ressources naturelles renouvelables et les incitations économiques", in *Ressources naturelles renouvelables*, OCDE, 1989, p. 12-31.
- PESSIS - PASTERNAK G, "Hasard ou déterminisme ?, la science au tribunal", *Futuribles*, Septembre 1991, p. 55-66.
- PIATIER A., "Innovation, information and long-term growth", *Futures*, vol. 13, n°5, October 1981, p.371-82.
- PILLAI S.M.C, "Future trends on use of fossil fuel and combined cycle for power generation", Conférence Mondiale de l'énergie, *l'énergie demain*, 1989.
- PILLET G. et al., "Exergy emergy and entropy", in G. PILLET, T. MUROTA, *Environmental economics, the analysis of a major interface*, Roland Leimgruber, 1987, p. 277-302.
- PILLET G., "Externalities in environmental macroeconomics", in G. PILLET, T. MUROTA et al., *Environmental economics, the analysis of a major interface*, R. Liemgruber, 1987, p.129-153.
- POINT P., "Allocation des ressources naturelles et phénomènes d'irréversibilité", *Economies et sociétés*, série F, n°25, septembre 1973, p.1613-1641. DE JOUVENEL B., "Les économistes et l'environnement", *Analyse et prévision*, tome XIII, 1972, p.53-75.
- POINT P, "Eléments pour une approche économique du patrimoine naturel", *Comptes du patrimoine naturel*, INSEE, c 137-138, p. 453-533.
- POSTEL S, HEISE L, "Reforestation the earth", *Economic impact*, 1988/4, p. 13-19.
- Pour la Science*, n° spécial, Gérer la planète, novembre 1989, n°145.
- Pour la Science*, n° spécial, l'énergie, novembre 1990, n°157.
- PRUDHOMME R., "La confrontation de l'analyse écologique et de l'analyse économique", *Revue économique du Sud-Ouest*, n°1, 1973.p.65-76.
- RADANNE P, "Vers un réchauffement global du climat", *Revue systèmes solaires*, Décembre 1988, Janvier-Février 1989, p. 74-81.

- RAMADE F., "Les catastrophes écologiques, une menace pour l'avenir de l'humanité", *Futuribles*, juillet-août 1989.p.63-78.
- RAMAIN P., "L'énergie dans le monde", *Les Cahiers Français*, n° 236, Mai-Juin 1988, p. 15-19.
- RASOOL I., "L'environnement global, science et politique", *Economie et Humanisme*, Juillet-Août 1989, p. 42-50.
- RAY G.Y., "Energy and the long cycles", *Energy economics*, january 1983.p.3-8.
- REJEWSKI P., ZEBROWSKI M., Technological innovations for ecologically sustainable development : the case of the chemical and energy industries in the content of energochemical systems technologies developent, *Working Paper* ,IIASA, n°788, aout 1987.
- Revue Economique*, Economie de l'environnement et du patrimoine naturel, vol. 41, n°2, mars 1990.
- Revue systèmes solaires*, numéro spécial 42-43-44, Décembre 1988, Janvier-Février 1989.
- RICHARD A., "Elements de synthèse entre valeur actualisé et délai de récupération. L'Effet irréversibilité", *Revue d'économie politique*, n°1, 1982,p.1-15.
- RICHARD A., "Quelques applications financières de la valeur d'option : structure des taux d'intérêt et actifs conditionnels, in.P. COHENDET, P. LLERENA et al., *Flexibilité, Information et Décision*, 1989, p. 199-225.
- RICHARD A., "Les produits pétroliers et la spéculation tirent le brut", *La tribune de l'expansion*, 7 mai 1992, p.17.
- ROGNER H.H., Technology and the prospects for natural gas, *Research report*, IIASA, n°4, novembre 1988.
- ROSENBERG N, C.R FRISCHTAK, "Long waves and economic growth : a critical appraisal", *American economic review*, papers and proceedings, May 1983, vol. 73, n° 2, p. 146-151.
- ROSS M, STEINMEYER D, "L'énergie industrielle", *Pour la science*, n° spécial, l'énergie, Novembre 1990, p. 58-66.
- SALOMON J-J., "What is technology ? The issue of its origins and definitions", *History and technology*, vol.I, 1984, 113-156.
- SARLOS G., VERSTRAETE P., "Le développement énergétique dans la dynamique de l'environnement", *Revue de l'énergie*, n°413, août-septembre 1989,P.633-658.

- SCHEFOLD B., "Ecological problems as a challenge to classical and keynesian economics", *Metoeconomica*, vol. 37, 1985,p.21-61.
- SCHEFOLD B, "Energy and economic theory", *Zeitschrift fur Wirtschafts - und Sozialwissenschaften*, vol. 97 (3), 1977, p. 227-249.
- SCHEFOLD B, ROSSNAGEL A, Un projet de recherche sur les conséquences sociales des choix énergétiques, Problèmes juridiques de l'énergie, Enseignement de 3ème cycle de droit, Universités de Berne, Fribourg, Genève, Lausanne et Neuchatel, Ed.universitaires Fribourg Suisse, 1982, p. 39-59.
- SCHOFELD B, "Une digression sur les ressources épuisables : existe t'il une théorie classique des ressources épuisables ?", in C. BIDARD et al., *La Rente, actualité de l'approche classique*, Economica, 1987, p. 83-97.
- SCHILIZZI S.G.M, "Physical economics, technology and agroecosystems", in G. PILLET, T. MUROTA, *Environmental economics, the analysis of a major interface*, Roland Leimgruber, 1987, p. 109-127.
- SCHMEDER G., "Prévision technologique, rétrospective critique", *Futuribles*, septembre 1988.
- Science et Avenir*, Environnement, les espoirs de la science, n°83, juillet-août 1991.
- Science et Avenir*, Précieuse planète, n° 78, hors série.
- SCITOVSKY T., "Two concepts of external economies", *Journal of political economy*, vol, LXII, avril 1954,p.143-151.
- SEBES (Stratégies énergétiques, biosphère et société)*, le nucléaire contre l'effet de serre?, mai 1990.
- SEBES*, la radioactivité et le vivant, novembre 1990.
- SEBES*, Forum interdisciplinaire indépendant, L'utilisation rationnelle de l'énergie, octobre 1991.
- SIMONIS U.E., "La modernisation écologique de la société industrielle : trois éléments stratégiques", *Revue internationale des sciences sociales*, 121, août 1989, p.383-399.
- SOLOMON B.D., GEORGIANNA T.D., "Optimal subsidies to new energy sources", *Energy economics*, july 1987,p.183-189.
- SOLOW R.M., "The Economics of Resources or the Resources of Economics", *American economic review*, may 1974, vol. 64, n°2,p.1-14.

- STREB A.J, "Energy efficiency and global warning", in OCDE/AIE, *Energy technologies for reducing emissions of greenhouse gases*, vol. 1, 1989, p. 87-113.
- STRUB R., "La contribution du gaz carbonique au changement climatique", *Revue SEBES*, mai 1990,p.35-40.
- SUISSA A, "Le nouveau charbon", *Les Cahiers Français*, n° 236, Mai-Juin 1988, notice 3.
- Terre Vive, *Quelles énergies pour demain ?*, n°1, septembre 1991.
- THEYS J., "L'environnement et les ressources du 21ème siècle", *Futuribles*, novembre 1987, p.3-24.
- THEYS J., HOURCADE J.C., MEGIE G., "Le bouleversement des climats. Comment gérer l'incertitude ?", *Futuribles*, mai 1989.p.3-19.
- THEYS J, "Les enjeux économiques des changements globaux", *Economie et Humanisme*, n° 308, Juillet-Août 1989, p. 51-61.
- THEYS J, "Les décennies décisives", *Les Cahiers Français*, n° 250, Environnement et gestion de la planète, Mars-Avril 1991, p. 125-128.
- UNAMA A.F, "Toward a biophysical foundation for economics", in H.E DALY, A.F UNAMA, *Energy, economics and the environment, conflicting views of an essential interclationship*, AAAS Selected Symposium, 1981, p. 21-41.
- UNIDO, "The role of energy in the industrial development in Africa", Conférence Mondiale de l'Energie, *Energie, Besoins, Espoirs*, 1986.
- VICTOR P.A., "Indicators of sustainable development : some lessons from capital theory", *Ecological economics*, 4, 1991, p.191-213.
- WATT K.E.F, "The nature of systems analys", in *Systems analysis in ecology*, Academic Press, New York, 1966, p. 1-14.
- ZEBOWSKI M, REJEWSKI P, Technological innovations for ecologically sustainable development : the case of the chemical and Energy Industries in the context of energochemical systems technologies development, *Working paper*, IIASA, August 1987.

TABLE DES MATIERES

Remerciements	2
Introduction générale.....	3
PREMIERE PARTIE : STRUCTURE, EVOLUTION ET GESTION A LONG TERME DU PATRIMOINE ENERGETIQUE	
Introduction de la première partie.....	14
<u>Première sous-partie : Organisation des ressources énergétiques et sphère économique : les relations d'interdépendance des niveaux physique et économique.....</u>	<u>15</u>
CHAPITRE 1 : L'EVOLUTION DU SYSTEME ENERGETIQUE : VERS UN ETAT D'INERTIE	
Introduction.....	16
Section 1 : Le système énergétique.....	16
§1 La notion de système énergétique.....	16
§2 Une mise en perspective historique.....	23
Section 2 : Le sens de l'évolution historique.....	30
§1 Les tendances à long terme.....	30
§2 Développement économique et énergie.....	41
Section 3 : L'état du patrimoine énergétique.....	51
§1 Les ressources énergétiques : une vue panoramique.....	51
A - Les ressources fossiles.....	54
B - Les ressources renouvelables.....	67
§2 Perspectives énergétiques pour le XXIème siècle.....	79
§3 Les limites de la mesure.....	90
Conclusion.....	96

CHAPITRE 2 : LE SYSTEME ENERGETIQUE ET LA BIOSPHERE

Introduction.....	97
Section 1 : La relation énergie-biosphère.....	97
§1 Elargissement du cadre spatio-temporel.....	97
§2 Le système énergétique , agent perturbateur de l'environnement naturel.....	101
A - La perturbation des cycles biogéochimiques.....	103
B - Les réactions homéostatiques de la biosphère.....	117
§3 Les conséquences à l'échelle planétaire.....	123
§4 Les réponses technologiques.....	133
Section 2 : Les besoins énergétiques et la contrainte environnementale.....	146
§1 Croissance économique et croissance de la consommation énergétique : un découplage durable ?.....	146
§2 La croissance démographique et la relation énergie-biosphère.....	162
A - Nature de l'évolution démographique.....	162
B - Transition démographique, ressources énergétiques, biosphère : les correspondances.....	170
Conclusion.....	183
<u>Deuxième sous-partie : Gestion intertemporelle des ressources énergétiques.....</u>	<u>184</u>
CHAPITRE 3 : L'EVALUATION MONETAIRE DES RESSOURCES ENERGETIQUES : UNE VISION REDUCTRICE DU REEL	
Introduction.....	185
Section 1: Formation des prix des ressources.....	185
§1 Approche néo-classique du système de prix.....	185
§2 L'analyse du rapport de force.....	194
Section 2 : Economie et biosphère : le conflit des rythmes et des logiques.....	201
§1 L'actualisation : les limites d'une procédure inadaptée.....	201
§2 Logique marchande contre logique non-marchande.....	210
Conclusion.....	218

CHAPITRE 4 : LE PRINCIPE DE CONSERVATION

Introduction.....	219
Section 1 : Satisfaction des besoins présents et économie des ressources énergétiques.....	219
§1 Le principe de conservation : un principe éthique	219
§2 Préservation, irréversibilité et incertitude.....	229
Section 2 : Les apports de la théorie de la valeur d'option.....	235
§1 Origine et développement de la théorie.....	235
§2 Applications de la valeur de quasi-option aux choix énergétiques en présence d'incertitude.....	243
§3 Les difficultés de la mesure du concept.....	250
Conclusion.....	259
Conclusion de la première partie.....	260

DEUXIEME PARTIE : DYNAMIQUE DU SYSTEME ENERGETIQUE, LOIS D'EVOLUTION ET EMERGENCE D'UNE NOUVELLE STRUCTURE FLEXIBILISEE

Introduction de la deuxième partie.....	261
<u>Première sous-partie : Une nouvelle approche du système énergétique et de la biosphère : l'intégration des principes thermodynamiques et leurs implications fondamentales.....</u>	262

CHAPITRE 5 : FONDEMENTS ET PRINCIPES DE LA THERMODYNAMIQUE

Introduction.....	263
Section 1 : Une rupture majeure dans l'évolution des sciences.....	264
§1 Origine, principes et évolution de la thermodynamique.....	264
§2 La thermodynamique et les sciences humaines.....	280
Section 2 : Une appréciation originale des ressources énergétiques.....	304
§1 Entropie et valeur économique de la ressource.....	304
§2 Entropie et rareté de la ressource.....	312
Conclusion.....	325

CHAPITRE 6 : LE SYSTEME ENERGETIQUE ET LA BIOSPHERE : UN SYSTEME THERMO-DYNAMIQUE OUVERT SUR LA BIOSPHERE

Introduction.....	326
Section 1 : Nature et propriétés du système énergétique.....	326
§1 Un système dissipateur ouvert sur la biosphère.....	326
§2 Un système d'essence organique.....	339
Section 2 : L'intérêt d'une approche systémique.....	344
§1 Les mécanismes de régulation : champ d'action et limites.....	344
§2 Une représentation du système global.....	352
Conclusion.....	360
<u>Deuxième sous-partie : Vers un nouveau système énergétique : modalités d'une transition et maîtrise de l'évolution entropique.....</u>	<u>361</u>

CHAPITRE 7 : BESOINS ENERGETIQUES ET CHOIX TECHNOLOGIQUES : VERS UN SYSTEME ENERGETIQUE "SOUTENABLE"

Introduction.....	362
Section 1 : Eléments de définition d'un nouveau système énergétique.....	363
§1 L'interdépendance des systèmes économiques et écologiques au niveau global.....	363
§2 Croissance du système énergétique et principe écologique de stabilité : l'union difficile.....	367
§3 Eléments pour une efficacité énergétique.....	375
Section 2 : L'exploitation du gisement potentiel de maîtrise énergétique.....	388
§1 Champs de substituabilité et potentiels technologiques.....	388
A - L'industrie.....	394
B - Résidentiel, tertiaire et agriculture.....	399
C - Les transports.....	403
§2 De la sous-utilisation du potentiel technologique disponible vers une plus large diffusion des technologies.....	411
Conclusion.....	427

CHAPITRE 8 : STRATEGIE DE MAITRISE DE L'EVOLUTION ENTROPIQUE

Introduction.....	428
Section 1 : Changements structurels au sein du système énergétique : l'intégration des contraintes environnementales.....	429
§1 Analyse de scénarios énergétiques futurs intégrant le "développement soutenable" : la convergence vers un nouveau système énergétique.....	429
§2 Les instruments de régulation pour la protection de la biosphère : des moyens d'action pour un système énergétique soutenable.....	446
Section 2 : La gestion de la transition.....	455
§1 Les sentiers d'évolution : une évolution irréversible vers la rupture ?.....	455
§2 La recherche d'une transition flexible : l'émergence d'un nouvel ordre.....	464
Conclusion.....	470
Conclusion de la deuxième partie.....	471
Conclusion générale	472
Bibliographie.....	484
Table des matières.....	510

RESUME

D'abord ignorées par le système économique, les ressources énergétiques ont progressivement été intégrées dans le champ de l'économie. Elles sont organisées au sein d'un ensemble cohérent que l'on définit comme système énergétique afin de satisfaire aux besoins des hommes, compte tenu de transformations préalables au moyen de convertisseurs.

Notre attention s'est focalisée sur les interactions existant entre le système énergétique et la biosphère, vaste écosystème contenant les ressources vivantes et inanimées. L'exploitation et l'utilisation des ressources énergétiques révèlent l'apparition de perturbations majeures au sein de la biosphère que ses mécanismes régulateurs neutralisent mal ou partiellement. Le système énergétique et la biosphère, loin d'avoir des logiques de fonctionnement opposées, mettent en évidence les limites d'une explication en terme de prix et d'une allocation des ressources selon les besoins des générations. On ne peut raisonnablement soutenir l'idée qu'une exploitation exclusive des ressources fossiles est légitimée par l'accroissement des besoins ou par des coûts d'extraction décroissants. Il est primordial de considérer les implications au sein de la biosphère : l'exploitation des ressources fossiles a pour corrolaire l'épuisement de ressources organisées - de basse entropie - et l'accumulation de rejets, éléments inorganisés et de haute entropie. Le problème est donc une augmentation irréversible de l'entropie que l'activité énergétique engendre en recourant aux ressources non renouvelables. Le système énergétique, système ouvert sur la biosphère - rôle du flux solaire -, participe activement à l'évolution entropique de l'univers. Sa structure est maintenue grâce à son ouverture sur la biosphère. Tel un organisme vivant, il se situe loin de l'équilibre - mis en évidence par des interactions non linéaires -. Le système énergétique est une structure dissipative au sens où l'a défini I. PRIGOGINE dans ses travaux sur la thermodynamique des processus irréversibles. Son évolution est donc celle d'un processus thermodynamique caractérisée par sa dépendance à l'égard du temps et son irréversibilité. L'état d'instabilité dans lequel il se trouve est directement lié à la diminution de sa variété illustrée par la prépondérance des ressources fossiles dans les activités humaines. La maîtrise de l'évolution entropique grâce au développement des ressources renouvelables au moyen de choix technologiques bien pensés implique le choix d'un sentier d'évolution du système énergétique différent de celui sur lequel il se situe. Cela implique de déterminer les conditions d'une stabilité pour le système, conditions qui dépendent du type de fluctuations. Des fluctuations conduisent le système vers des états ou structures différents. Une nouvelle organisation émerge en des points particuliers appelés points de bifurcation. Finalement, la recherche d'une plus grande stabilité va rejoindre celle d'un sentier d'évolution flexible permettant un recours minimum aux stocks de ressources fossiles et autorisant l'accumulation de l'information - ou néguentropie - croissante dans le temps. La transmission de la connaissance contribue à la complexification du système au sein duquel un nouvel ordre émerge.

Mots clés : énergie - ressource naturelle - environnement - entropie - gestion intertemporelle - valeur d'option - structure dissipative - technologie - thermodynamique - irréversibilité.

SUMMARY

After being a long time out of the economic system, energetic resources have been gradually considered by economics. They are arranged in a consistent system, which is defined as energetic system, where transformation technologies are used in order to satisfy the human needs.

Our attention is focused on interactions between the energetic system and the biosphere, wide ecosystem holding living and inorganic resources. The development and the use of energetic resources show the emergence of important disruptions within the biosphere whose regulating mechanisms neutralize with some difficulty. Energetics system and the biosphere, being far from having opposite operating logics display the limits of an explanation in words of price and of resources allocation depending on generations needs. We can't agree with the idea that an exclusive development of fossil resources is justified by growing needs or by extraction costs decreasing. It's of a great importance to consider the implications within the biosphere : the development of fossil fuels leads to the depletion of organized resources - of low entropy - and the accumulation of wastes, disorganized elements and of high entropy. The problem is so an irreversible increase of entropy that energetic activity generates by using non renewable resources.

The energetic system, which is an open system on the biosphere - role played by the solar flow -, takes an active part in the entropic evolution of the universe. Its structure can be maintained owing to its opening on the biosphere. Such a living organism, he takes place far from the equilibrium - as non-linear interactions can reveal -. The energetic system is a dissipative structure as I. PRIGOGINE has explained its meaning in his works about thermodynamics of irreversible process. Its evolution is therefore the one of a thermodynamic process characterized by its dependance with reference to time and its irreversibility. The state of instability where it stands is directly connected with the decrease of its variety showed by the preponderance of fossil resources in the human activities.

The control of entropic evolution to renewable resources development by means of suitable technological choices involves the choice of a different evolution path of energetic system. For this purpose, stability conditions depending on the type of fluctuations must be take into account. These fluctuations lead the system to different states or structures. A new organization can appear into particular points called bifurcation points. At last, the research of a greater stability is meeting the research of a flexible evolution path allowing a minimum resort to fossil fuels stocks and increasing information - or, "neguentropy" - storage during the time. The transmission of knowledge play so a great part in the system complexification where a new order is going to rise.

Keywords : energy - natural resource - environment - entropy - intertemporal management - option value - dissipative structure - technology - thermodynamics - irreversibility.