

**La dimension énergétique du développement durable :**  
**le cas de la production d'électricité**

Thèse présentée à la Faculté des Sciences Economiques  
de l'Université de Neuchâtel

Pour l'obtention du grade de docteur ès science économique  
par

**Stéphane Genoud**

Directeur de thèse :

**Milad Zarin**, Professeur d'Economie, Université de Neuchâtel

Acceptée sur proposition du Jury :

**Fabrizio Carlevaro**, Professeur d'Economie, Université de Genève

**Jean-Marie Grether**, Professeur d'Economie, Université de Neuchâtel

**Jean-Baptiste Lesourd**, Professeur d'Economie, Ecole de journalisme et de  
communication de Marseille

Soutenu à Neuchâtel, le 27 juin 2011

Université de Neuchâtel

2012



IMPRIMATUR POUR LA THÈSE

La dimension énergétique du développement durable :  
le cas de la production d'électricité

**Stéphane GENOUD**

---

UNIVERSITÉ DE NEUCHÂTEL  
FACULTÉ DES SCIENCES ÉCONOMIQUES

La Faculté des sciences économiques,  
sur le rapport des membres du jury

Prof. Milad Zarin-Nejadan (directeur de thèse, Université de Neuchâtel)  
Prof. Jean-Marie Grether (président du jury, Université de Neuchâtel)  
Prof. Jean-Baptiste Lesourd (Université de la Méditerranée, Marseille)  
Prof. Fabrizio Carlevaro (Université de Genève)

Autorise l'impression de la présente thèse.

Neuchâtel, le 27 octobre 2011

Le doyen



Gerald Reiner



A mes professeurs, mes parents et ma compagne pour le soutien sans faille qu'ils m'ont tous témoigné pendant ces longues années d'étude. Merci à vous tous.

Merci aussi à mes relecteurs, qui ont eu du travail...



Mots clefs :

Énergie, Économie, Exergie, Rendement, Thermodynamique, Indicateur de développement durable, Classement multicritère, Monitoring, Production d'électricité, Critères de classement, Outil d'aide à la décision.

Résumé :

Comment choisir la meilleure des filières de productions d'énergie électrique ?

Avec quels outils et sur quels critères ?

Cette thèse propose une approche originale de classement, sur les principes du développement durable, des modes de production d'électricité, s'appuyant à la fois sur des outils issus de la science économique et sur des outils de l'ingénieur.

Une application sur les filières les plus présentes en suisse permettra de comprendre l'approche proposée.



## **Table des Matières**

1	Introduction générale	11
2	Le second principe de la thermodynamique et l'économie	17
2.1	Introduction	17
2.2	Les bases fondamentales de la thermodynamique	18
2.3	Remarques finales du Chapitre 2	46
3	Thermodynamique et économie : vers des indicateurs de développement durable fondés sur l'exergie	49
3.1	Introduction	49
3.2	Thermodynamique et économie : les premières approches	50
3.3	Durabilité, processus de production et irréversibilité : indicateur du développement durable basé sur l'exergie	55
3.4	Application	60
3.5	Remarque finale du Chapitre 3	66
4	Comparaison de différentes méthodes de classement d'indicateurs de développement durable	69
4.1	Introduction	69
4.2	Deux méthodes de monitoring du développement durable	71
4.3	Applications	83
4.4	Remarque finale du Chapitre 4	93
5	Caractérisation d'indicateurs de développement durable pour les technologies de production d'électricité	95
5.1	Introduction	95
5.2	Les filières de production d'électricité	95
5.3	Les critères de classement des filières de production d'électricité	101
5.4	Choix de la méthode de classement	105

5.5	Application numérique	107
5.6	Remarques finales du Chapitre 5	109
6	Conclusion	113
7	Annexe A : Données Chapitre 4	119
8	Annexe B : Données Chapitre 5	131
9	Bibliographie	135

# 1 Introduction générale

Le présent travail cherche à prendre en compte toutes les dimensions non marchandes dans la recherche d'un équilibre général. Nous savons que le prix, indicateur de rareté, n'incorpore pas toutes les dimensions du développement durable, en particulier pour la sphère sociale et la sphère environnementale. L'objectif de ce travail est de montrer comment incorporer ces dimensions non marchandes dans l'analyse de systèmes complexes, comme le sont les systèmes énergétiques produisant de l'électricité, compte tenu des contraintes imposées à nos sociétés.

Nous nous inscrivons donc dans une approche du développement durable selon la définition issue du rapport Brundtland (WCED (1987)), soit : «Le développement durable est un mode de développement qui répond aux besoins du présent sans compromettre la capacité des générations futures de répondre aux leurs ». Pour atteindre cet objectif, il faut associer trois sous-objectifs, l'efficacité économique, l'équité sociale et la préservation de l'environnement. Les moyens pour y parvenir relèvent de la gouvernance et du management. Nous allons démontrer la nécessité de définir des critères se rapportant aux trois sous-objectifs pour choisir, entre les différents chemins possibles, celui qui se rapproche le plus du développement durable.

Dans un premier temps nous nous intéresserons à la qualification de systèmes énergétiques en introduisant la théorie de la thermodynamique (Borel (1991), Ayres et Martinàs (1996), Van Den Heuvel (1998)), et plus particulièrement le deuxième principe de thermodynamique. Pour cela il sera nécessaire de présenter les bases de la théorie de la thermodynamique macroscopique. Ces bases nous permettront de présenter une notion très importante qu'est l'entropie. Cette notion permet de prendre en compte l'évolution irréversible d'un système complexe et, dans le cas d'un système fermé, de démontrer qu'il existe une limite théorique à l'évolution. L'entropie sera alors utilisée comme indicateur d'évolution.

Nous présenterons aussi, très brièvement, les utilisations passées de la théorie de la thermodynamique en économie, en suivant la classification de Bruggink (1985), qui se préoccupe de la nature épistémologique de la relation entre la thermodynamique et l'économie, et distingue les relations empiriques des relations heuristiques. Ces dernières sont de deux types ; les analogies formelles et les analogies paradigmatiques. L'auteur principal qui s'est le plus penché sur cette approche est Georgescu-Roegen (1967, 1971, 1976 et 1979), à l'origine d'un certain nombre de travaux avec Passet (1979) et Ayres (1996). Malgré l'intérêt de ces approches, elles n'ont que peu d'importance dans notre travail. En effet, notre préoccupation principale concerne un domaine peu exploré, celui des

relations de type empirique entre les théories thermodynamiques et économiques à considérer ici comme cadre pour observer le fonctionnement physique de l'économie. Cette approche est défendue par des auteurs comme Faber *et al.* (1987), Kummel *et al.* (2000), Pasquier (1997), Wall *et al.* (1994), Borel (1988 et 1991), Berry *et al.* (1978), Grubbström (1984), Lesourd *et al.* (1981, 1985, 1986, 1989 et 1990), Le Goff (1990).

Ceci étant, le terme « empirique » pourrait laisser à penser que ces relations n'ont pas d'intérêt fondamental, alors que, bien au contraire, elles amènent un intérêt théorique, puisqu'elles intègrent la notion de rareté, ici de l'énergie, qui est le fondement de la théorie économique. On démontrera ainsi que l'énergie utile, au sens économique, est fondamentalement un bien rare et essentiel.

Le deuxième intérêt de ces approches, sur lesquelles d'autres auteurs, déjà cités plus haut, se sont penchés, tels que Pasquier (1997), Berry *et al.* (1978), Lesourd (1981, 1985, 1990, 2001), est de lier la théorie de la thermodynamique au développement durable. Ce domaine n'a pas complètement été exploré, en particulier sous l'angle qui est le nôtre, à savoir l'introduction de l'exergie dans les indicateurs du développement durable. A notre connaissance aucune autre application de ces considérations n'a été proposée. Nous verrons que l'indicateur proposé, qui prend en compte, pour les sources énergétiques, leur nature durable ou non, pose quelques problèmes. Ces derniers justifient une approche plus complexe basée sur les outils d'aide à la décision multicritère. D'un point de vue micro-économique, nous démontrerons aussi formellement qu'il existe un lien direct entre la formation du prix d'une énergie et le potentiel de chaleur qu'elle peut fournir. Nous présenterons ici, une utilisation économique du concept d'exergie, en définissant le potentiel d'énergie utile qu'une source énergétique peut fournir.

Après avoir focalisé notre réflexion sur les systèmes énergétiques, nous reviendrons sur notre préoccupation de choisir, parmi plusieurs chemins possibles, celui qui est le plus durable, en particulier pour les systèmes énergétiques et en intégrant toutes les dimensions, qu'elles soient monétaires ou non. Nous mettrons en évidence la difficulté de choisir une méthode d'agrégation pour construire des indicateurs composites permettant justement de faire ce choix. Nous mettrons également en évidence les lacunes des agrégations complètes utilisées par plusieurs méthodes d'aide à la décision. Certaines de ces méthodes cherchent à définir une fonction d'utilité sociale, représentant les préoccupations d'une société, en agrégeant les préférences individuelles. Or, Condorcet (1786) a mis en évidence l'impossibilité de s'appuyer sur des votes pour obtenir une préférence sociale cohérente, et a justifié la recherche d'autres approches de classement de choix ou d'options. Ses travaux ont, par la suite, débouché sur la Théorie du choix social. Les problématiques du choix social

sont très voisines des problèmes d'agrégation, comme le font remarquer Bouyssou et Perny (1997), car elles consistent à rechercher un mécanisme permettant d'agréger, d'une manière raisonnable, les avis exprimés lors d'un processus d'élection d'un vainqueur.

Nous proposerons, par la suite, une méthode permettant aux décideurs de choisir entre plusieurs solutions à multiples objectifs, ici, celles du développement durable, tout en considérant des critères très différents et quelques fois antagonistes. Les travaux de l'OCDE /JRC (2005) sur la construction d'indicateurs composites relèvent justement du fait que le choix de la méthode d'agrégation est difficile et qu'il n'existe aucune agrégation parfaite<sup>1</sup>. Ils précisent aussi que, dans le contexte des indicateurs composites, « cette circonstance donne lieu à deux questions : est-il possible de trouver un algorithme de classement conforme à certaines propriétés souhaitables, et inversement, est-il possible de s'assurer qu'aucune propriété essentielle n'est perdue ? » (OCDE/JRC (2005), p. 105). C'est pourquoi, nous présenterons deux approches qui peuvent nous aider dans ce choix : les approches de benchmarking (Charnes *et al.* (1978)) non paramétriques<sup>2</sup> et les approches multicritères (Roy (1985)). Nous comparerons ces deux approches du point de vue méthodologique, ainsi que de celui des résultats obtenus.

Après avoir mis en évidence le fait que l'utilisation du deuxième principe de thermodynamique est essentiel à la qualification d'un système énergétique, nous aurons alors aussi proposé une méthode de classement prenant en compte une grande diversité de critères et une pluralité d'objectifs. Il restera enfin à appliquer cette approche à la production d'électricité. Pour cela, une analyse des filières énergétiques sera réalisée « du berceau à la tombe » (Lesourd et Schilizzi (2003), OCDE (1985), Dones *et al.* (2004), Dones *et al.* (2005)) en distinguant deux sources d'énergie, les sources renouvelables et les sources non renouvelables (Rousseaux et Apostol (2000)). Nous définirons ensuite les critères permettant d'atteindre une production d'électricité répondant à l'objectif d'un développement durable. Ces critères seront naturellement définis pour les trois sphères du développement durable, soit l'économie, l'écologie et l'aspect social. L'application numérique permettra de proposer un classement des différentes filières énergétiques.

---

<sup>1</sup> Voir OCDE/JRC (2005), p. 105

<sup>2</sup> Appelée aussi « geometric aggregation » dans OCDE/JRC (2005). Approche entre les compensations totales et la non-compensation.

Après la présente introduction, le Chapitre 2 rappelle les principes de la thermodynamique phénoménologique et renouvèle la discussion des implications économiques de ces principes, en complétant les travaux antérieurs sur l'interface entre la thermodynamique et l'économie.

Le Chapitre 3 se présente comme une application du Chapitre 2 utilisant le concept d'exergie décrit. Nous nous intéressons ensuite aux liens entre exergie et microéconomie de la production. Ce travail, qui a fait l'objet d'une publication (Ferrari *et al.* (2001)), se situe dans une perspective voisine qui est celle des travaux d'auteurs comme, entre autres, Grubbström (1984), Lesourd et Hallegatte (1986) et Berry *et al.* (1978).

Ce Chapitre 3 amène la conclusion que l'exergie, définie du point de vue physique comme l'énergie effectivement utile, est aussi un bien nécessaire et rare du point de vue économique. Son prix élevé résulte de l'équation d'escompte par la température de Grubbström, théorie reprise par l'article de Ferrari *et al.* (2001) sous un angle différent et de manière originale. Étant donné qu'une bonne partie des énergies utilisées dans les sociétés industrielles contemporaines ne sont pas renouvelables, cette approche théorique met tout naturellement en valeur un critère de développement durable. Ce dernier est fondé sur une combinaison moyenne pondérée par le rendement exergétique des sources d'énergies renouvelables et non renouvelables. Une application concrète relative au chauffage urbain illustre l'application de ce critère.

Le Chapitre 4 montre que le problème des indicateurs de développement durable est par sa nature même un problème multicritère c'est-à-dire qu'il existe plusieurs indicateurs. L'indicateur précédent, fondé sur le rendement exergétique, n'est qu'un indicateur parmi d'autres. A ce dernier, il faut en effet ajouter un certain nombre d'indicateurs d'impacts sur l'environnement, ainsi que des indicateurs sociaux et économiques. Il est éventuellement possible d'agréger de tels indicateurs, mais comme nous l'avons déjà souligné, c'est un problème difficile à résoudre. La comparaison des situations peut être réalisée à travers diverses autres méthodes. Tout d'abord, on peut se livrer à un exercice de benchmarking par des méthodes dites de *data envelopment analysis* (DEA), à un niveau plus ou moins agrégé. Mais, finalement, on montrera qu'une méthode de choix pourrait être une méthode d'agrégation partielle telle que l'une des méthodes ELECTRE dues à Roy (1985), ou la méthode dite MACBETH dues à Bana *et al.* (2000). Une application est réalisée à un niveau macroéconomique, avec pour but une comparaison multicritère de la méthode de type ELECTRE avec la méthode DEA, pour divers pays à travers un choix de plusieurs indicateurs de développement durable. Le Chapitre 4 élargit donc la perspective, en montrant qu'il y a plusieurs indicateurs de développement durable, où l'exergie, définie au

Chapitre 2, ne représente qu'un indice parmi d'autres. Ce travail, qui a fait l'objet d'une publication (Carlevaro *et al.* (2002)) a conduit à une analyse multicritère et à une présentation originale des diverses méthodes multicritères utilisables.

Le Chapitre 5 applique ces diverses méthodes, et notamment des méthodes d'analyse multicritère, pour comparer diverses techniques de transformation de l'énergie à travers une série d'indicateurs de développement durable, en s'appuyant sur les données des analyses de cycle de vie (ACV). Un certain nombre d'indicateurs de développement durable sont ainsi définis, auxquels s'ajoute le rendement exergetique. Avec un choix adéquat des pondérations, on aboutit à un classement des diverses filières. Ce travail a fait l'objet d'une publication (Genoud et Lesourd (2009)).



## 2 Le second principe de la thermodynamique et l'économie<sup>3</sup>

### 2.1 Introduction

La question des relations entre la thermodynamique phénoménologique (macroscopique) et la théorie économique est une question très délicate, qui n'a donné lieu qu'à des recherches sporadiques concernant aussi bien les physiciens que les économistes, principalement depuis le début des années 1970.

Ce vaste champ interdisciplinaire et de transition est intéressant de plusieurs points de vue. Le point de vue qui nous intéresse ici est celui du lien entre les principes de la thermodynamique en tant que contraintes et la micro-économie de la production. Sur ce thème, on peut citer plusieurs travaux, qui donnent des éclairages intéressants sur les modèles de la micro-économie de la production. Sous cet angle particulier, les travaux, déjà anciens, de De Montbrial (1976), Berry *et al.* (1978), Lesourd et Gousty (1981), Lesourd (1985), Lesourd et Hallegatte (1986) et Lesourd (1990) doivent être mentionnés. Ces travaux s'intéressent aux relations entre les principes de la thermodynamique phénoménologique et les concepts de la micro-économie de la production, comme les fonctions de production, ainsi qu'aux relations entre les optimums économiques et les optimums thermodynamiques.

D'autres auteurs, tels que Dasgupta et Heal (1979) ont étudié les possibilités de substitution entre des ressources épuisables et du capital reproductible à l'aide du concept de facteur de production essentiel. Une condition suffisante pour qu'un facteur soit essentiel est que sa productivité moyenne soit bornée ; la réciproque est fautive (Shephard (1970) et Lesourd (1985)). De plus, la prise en compte de la ressource « énergie » dans les formes fonctionnelles traditionnelles (Cobb-Douglas, CES) n'est pas satisfaisante si on considère le fait que la productivité moyenne de l'énergie dans les processus de production est toujours bornée, en raison des principes physiques qui s'y appliquent (principes de la thermodynamique). Du fait de cette propriété, on peut montrer que l'élasticité de substitution d'une fonction de production C.E.S. à deux facteurs, dont l'un est l'énergie, est

---

<sup>3</sup> Publié à l'origine par le centre universitaire d'étude des problèmes de l'énergie avec le titre : Genoud, S., (2000), Le deuxième principe de thermodynamique et l'économie, Travail de diplôme post-grade en énergie EPFL , Centre universitaire d'étude des problèmes de l'énergie, Genève. Travail récompensé par le prix SIG 2001.

nécessairement inférieur à l'unité (Dasgupta et Heal (1979)). Si la fonction étudiée est à élasticité variable, l'élasticité tend vers une limite qui est inférieure à l'unité tandis que le ratio capital/énergie augmente. Dans les deux cas, en l'absence de progrès technique, le niveau de consommation qui accompagne le niveau d'output de l'économie n'est pas viable. Toujours d'après l'analyse de Dasgupta et Heal (1979), si l'énergie est, de plus, une ressource épuisable, il apparaît que l'économie en question n'est non seulement pas en mesure de connaître un développement durable, mais de surcroît est, à terme, condamnée.

Au cours du présent chapitre, nous allons nous attacher à dégager les liens entre thermodynamique phénoménologique et la micro-économie de la production, sous une forme nouvelle qui, selon notre connaissance du moins, ne semble pas avoir fait l'objet de travaux récents, même exploratoires. L'énergie utile du point de vue économique y est à l'évidence un facteur pour toute production effectivement concevable.

## **2.2 Les bases fondamentales de la thermodynamique**

Plusieurs définitions de la thermodynamique ont été trouvées, entre autres :

« La thermodynamique est la branche de la science qui traite les phénomènes d'équilibre physique (et chimique) et l'extraction d'un travail utile d'un procédé d'équilibre dans un système. C'est l'une des branches importantes de la science, car elle traite de la partie utilisable des composants des stocks et des flux d'énergie. L'énergie est le phénomène à la base des processus physiques. La loi de thermodynamique est donc fondamentale pour chaque action, chaque réaction, chaque événement et autres changements qui se passent dans l'univers » (Ayres et Martinàs (1996)).

Il existe deux approches différentes de la thermodynamique : l'approche phénoménologique et l'approche statistique. La première « s'appuie sur des considérations macroscopiques. Elle cherche à établir des lois macroscopiques basées sur un nombre réduit de principes ou postulats, qui sont des lois empiriques établies par des observations expérimentales. Elle détermine en outre les propriétés spécifiques des différents corps à l'aide de mesures » (Borel (1991)). La deuxième « s'appuie sur des considérations moléculaires et sur le calcul de probabilité. Elle cherche à établir les principes fondamentaux et à pénétrer plus en avant dans la structure de la matière pour en expliquer les propriétés, cela à partir de lois naturelles encore plus générales » (Borel (1991)).

Lorsque l'on s'intéresse à « l'étude des problèmes faisant intervenir l'énergie mécanique et l'énergie thermique » (Borel (1991)), on se base sur la thermodynamique phénoménologique. L'utilisation de la thermodynamique statistique est liée à la mécanique

statistique, « qui vise à décrire les systèmes complexes d'un point de vue microscopique, en termes d'interactions dynamiques (mécaniques) entre ses constituants » (Van Den Heuvel (1994)).

La thermodynamique est fondée sur quatre principes qui sont en réalité des axiomes dans tous les exposés de la thermodynamique, validés entièrement par toutes leurs conséquences expérimentales.

Le principe zéro permet de définir la grandeur physique qu'est la température. Selon ce principe, deux systèmes physiques en équilibre avec un troisième sont en équilibre entre eux. Il s'agit ici d'une relation qui permet de définir une grandeur commune à tout système en équilibre avec un autre, appelée température. Cette relation est similaire à la relation d'indifférence entre deux paniers de biens regroupés sur la même courbe d'indifférence. Cette grandeur d'utilité est exactement comme la grandeur température.

Le premier principe définit la notion quantitative d'un processus physique. Le second principe permet une approche qualitative de ce processus. Nous représentons ci-dessous un résumé de ces principes, il existe aussi un troisième principe de la thermodynamique qui affirme l'impossibilité d'atteindre le zéro absolu en un nombre fini d'opérations. Cependant, ce principe n'a aucune implication économique et ne sera mentionné ici que pour mémoire.

### **2.2.1 Le principe zéro**

« Si deux systèmes thermodynamiques A et B sont en équilibre thermique avec un troisième C, ils sont eux-mêmes en équilibre » (Borel (1991)).

De plus l'auteur précise que « le principe zéro est une loi empirique, établie seulement par des observations expérimentales ».

En fait, il ne s'agit que d'une coïncidence de forme, car les systèmes en équilibre thermique ne sont pas forcément identiques. En regardant la figure 1, on remarque que les trois systèmes sont effectivement en équilibre thermique, mais comme il y a une paroi conductrice entre chaque système, les pressions ou les volumes massiques<sup>4</sup> ne sont pas forcément identiques.

---

<sup>4</sup> Le volume massique est le rapport du volume sur la masse.

Paroi conductrice

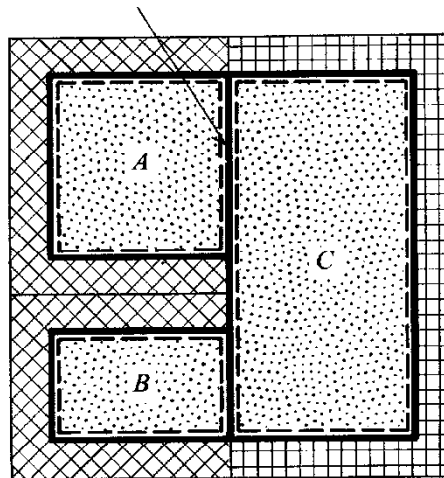


Figure 1 : système en équilibre<sup>5</sup>

En règle générale, les évaluations de température sont basées sur le principe de la thermodynamique.

Comme soulevé précédemment, le principe zéro permet de définir la grandeur de la température. On peut constater une analogie formelle avec la théorie micro-économique des préférences, où la relation de préférence et d'indifférence définit si un panier de biens est préféré à un autre. La théorie des préférences permet de tirer d'une fonction d'utilité des courbes d'indifférence sur lesquelles il y a indifférence pour le consommateur entre différents paniers. Le principe zéro, quant à lui, définit les courbes isothermes, comme un ensemble de points correspondant à des corps en équilibre entre eux. Ces deux théories sont formellement équivalentes, car elles sont fondées sur une relation caractérisée par les propriétés de complétude, de transitivité, de continuité, de non-satiété et de convexité. L'échelle des températures est donc, dans cette théorie, équivalente à l'échelle d'utilité dans la théorie des préférences.

---

<sup>5</sup> Tirée de Borel (1991) page 8.

## 2.2.2 Le premier principe

Avant de définir le premier principe de thermodynamique, il est nécessaire de parler de l'enthalpie. Cette notion est introduite par Gibbs (1902) comme une mesure de l'énergie totale contenue dans le système et qui est définie par :

$$H \equiv U + V \cdot P \quad \text{équ. 1}$$

où  $H$  : enthalpie [J],

$U$  : énergie interne [J],

$V$  : volume [ $\text{m}^3$ ],

$P$  : pression [Pa].

Dans un certain sens, l'enthalpie est la mesure, au regard du premier principe, de la quantité d'énergie contenue dans un système. Pour donner une notion de qualité, il faut introduire le deuxième principe.

Nous définissons le 1<sup>er</sup> principe par :

*Dans un système thermodynamique, adiabatique et fermé, pour faire passer le système en question d'un état déterminé 1 à un autre état déterminé 2, il faut mettre en jeu un certain travail<sup>6</sup>. Ce dernier est indépendant de la succession des états intermédiaires entre l'état 1 et l'état final 2 et du genre d'énergie mise en jeu (mécanique, électrique, ou autre).*

L'accroissement d'énergie interne total d'un système thermodynamique fermé est égal à la somme d'énergie-travail et d'énergie-chaleur reçue par le système de l'extérieur.

Le premier principe de la thermodynamique introduit le concept d'énergie et exprime une propriété de conservation impliquant que l'énergie, considérée sous toutes ses formes, doit rester constante au cours de la transformation d'un système isolé.

Le premier principe exclut le mouvement perpétuel dans un système isolé.

---

<sup>6</sup> Le travail élémentaire d'une force est défini comme étant le produit scalaire de cette force par le déplacement élémentaire de son point d'application.

En terme mathématique cela signifie :

$$\Delta U_{cz} = \sum_k [E_k^+] + \sum_i [Q_i^+] + \sum_j \left[ \int h_{czj} \cdot dM_j^+ \right] \quad \text{éq. 2}$$

où  $\Delta U_{cz}$ <sup>7</sup> : variation d'énergie interne totale [J] = l'énergie-travail reçue de l'extérieur,

$E^+$  : énergie-travail technique<sup>8</sup> [J], définie comme l'énergie-travail reçue seulement au niveau des parties mobiles,

$Q^+$  : énergie-chaleur reçue [J],

$h_{cz}$  : enthalpie massique totale<sup>9</sup> [J/kg],

$dM^+$  : accroissement de la masse reçue [kg/s].

Pour illustrer ce principe, prenons l'exemple d'un chauffage électrique<sup>10</sup> : il est possible de transformer du travail en chaleur avec une efficacité de 100 %, mais la réciprocité n'est pas possible. Le sens unique de cette conversion constitue le centre de la seconde loi de thermodynamique traitée plus bas.

En termes de puissance, cela donne :

$$\frac{dU_{cz}}{dt} = \sum_k [\dot{E}_k^+] + \sum_i [\dot{Q}_i^+] + \sum_j [\dot{H}_{czj}^+] \quad \text{éq. 3}$$

avec

$$\dot{E}_k^+ \equiv \frac{dE_k^+}{dt} \quad \text{éq. 4}$$

définie comme la puissance-travail technique reçue par le système,

---

<sup>7</sup> L'indice cz indique que l'on intègre, en plus de l'énergie interne, l'énergie cinétique et l'énergie potentielle gravifique.

<sup>8</sup> Le signe + indique que la grandeur considérée est reçue, par le système, de l'extérieur.

<sup>9</sup> Le terme massique signifie que l'on a rapporté l'enthalpie à la masse considérée.

<sup>10</sup> L'électricité est en fait du travail.

$$\dot{Q}_k^+ \equiv \frac{dQ_k^+}{dt} \quad \text{équ. 5}$$

définie comme la puissance-chaleur reçue par le système,

$$\dot{H}_{czj}^+ \equiv \frac{dH_{czj}^+}{dt} = h_{cz} \cdot \dot{M}_j^+ \quad \text{équ. 6}$$

défini comme le débit-enthalpie total reçu par le système.

L'approche énergétique peut alors être définie.

Si l'on considère un système quelconque, donnant lieu à des transferts-travail, des transferts-chaleur et des transferts de masse, en vertu du premier principe de la thermodynamique, le bilan énergétique, en tenant compte de la pression atmosphérique et de l'énergie effective totale, est exprimé par :

$$-\frac{dU_{ecz}}{dt} + \sum_k [\dot{E}_{ek}^+] + \sum_i [\dot{Q}_i^+] + \sum_j [h_{czj} \cdot \dot{M}_j^+] = 0 \quad \text{équ. 7}$$

où

$U_e$  : énergie effective totale<sup>11</sup>

$E_e$  : énergie travail effective

Un réseau est défini comme toute partie du système comportant des espaces contigus, susceptibles de contenir ou d'être traversés par des fluides. Cette définition implique que deux réseaux différents sont séparés par une surface située à la limite ou à l'intérieur de parois solides. Ces parois peuvent être mobiles et conductrices, de sorte qu'il peut y avoir transferts-travail et transferts-chaleur d'un réseau à l'autre. La seule restriction est qu'il ne peut y avoir des transferts de masse.

Il est possible de définir la puissance-transformation effective  $\dot{W}_{en}^+$  reçue au niveau de chaque réseau n. Le bilan énergétique en puissance s'écrira alors :

---

<sup>11</sup> Le terme « effective » signifie que l'on prend en compte la pression atmosphérique comme référence de calcul.

$$\sum_k [\dot{E}_{ek}^+] + \sum_i [\dot{Q}_i^+] + \sum_n [\dot{W}_{en}^+] = 0 \quad \text{éq. 8}$$

Enfin, nous pouvons aussi définir l'énergie-transformation effective  $W_{en}^+$  reçue au niveau du réseau n, ce qui nous permet d'écrire le bilan énergétique relatif à un temps  $\Delta t$ , soit :

$$\sum_k [E_{ek}^+] + \sum_i [Q_i^+] + \sum_n [W_{en}^+] = 0 \quad \text{éq. 9}$$

Pour être complet, il faut encore définir la notion d'efficacité, qui est le rapport des puissances données et des puissances reçues par le système, soit :

$$\varepsilon = \frac{\sum_k [\dot{E}_{ek}^-] + \sum_i [\dot{Q}_i^-] + \sum_n [\dot{W}_{en}^-]}{\sum_k [\dot{E}_{ek}^+] + \sum_i [\dot{Q}_i^+] + \sum_n [\dot{W}_{en}^+]} \quad \text{éq. 10}$$

Cette formulation n'est pas très satisfaisante, car dans certaines installations, comme les thermopompes (pompes à chaleur), l'efficacité est nettement plus grande que 100 %.

De plus, cette relation ne permet pas de tenir compte de la dégradation de la température. Le « rendement » du chauffage électrique est de 100 %. Cette affirmation est vraie uniquement si l'on ne considère que le premier principe de thermodynamique. C'est bien de l'efficacité (énergétique) et non du « rendement » du chauffage dont on parle, car ce terme devrait être réservé au deuxième principe de thermodynamique. Avec le deuxième principe, le rendement exergétique du chauffage électrique n'est plus que de 7 %, chiffre présenté au point 2.2.4.

Le 1<sup>er</sup> principe n'a pas vraiment d'implication économique. Ce principe à lui seul ne permettrait pas de considérer l'énergie comme un bien rare. Il permettrait indéfiniment, d'extraire de l'énergie d'une source, en la réintroduisant sans aucune perte, ce qui autoriserait l'existence d'un mouvement perpétuel. Nous allons voir que cela est exclu par le second principe.

### 2.2.3 Le deuxième principe

Avant de présenter le deuxième principe proprement dit, il est nécessaire de définir la notion d'irréversibilité. Dans la formulation du premier principe, nous avons vu que nous pouvons transformer du travail en chaleur avec une efficacité de 100 % (pour le chauffage électrique). Cependant, la réciprocité n'est pas vérifiée.

La distinction entre les opérations irréversibles et réversibles, nous permet de différencier trois familles de la théorie de la thermodynamique :

- la thermodynamique à l'équilibre implique que les systèmes sont isolés et fermés,
- la thermodynamique linéaire proche de l'équilibre implique que l'entropie du système est maintenue constante et que la relation entre les flux et les gradients est considérée comme linéaire,
- la thermodynamique non linéaire s'intéresse aux systèmes ouverts, loin de l'équilibre. La relation entre les flux et les gradients ne peut plus être considérée comme linéaire.

Nous verrons plus bas que cette distinction est importante pour comprendre les critiques émises par plusieurs auteurs à l'encontre des précurseurs de l'utilisation du deuxième principe de thermodynamique dans l'économie, entre autres Nicolas Georgescu-Roegen (1967).

Deux types d'opérations irréversibles peuvent être distingués, les opérations mécaniques (transfert-travail et transfert de masse) et les opérations thermiques (transfert-chaleur).

Un système thermodynamique recevant de l'énergie subit une transformation thermodynamique, c'est-à-dire que toutes ses grandeurs d'état (par exemple la pression, la température, ...) évoluent de façon à s'adapter aux nouvelles contraintes extérieures. Le système tend alors vers un nouvel équilibre correspondant à un nouvel état final. L'énergie reçue par le système de l'extérieur, au cours de l'opération, est  $E^+$ ,  $M^+$  ou respectivement  $Q^+$ . Entre ces deux états d'équilibre, le système est déséquilibré.

L'irréversibilité mécanique vient de la rapidité à laquelle le transfert d'énergie est effectué. Plus le transfert est rapide, plus l'irréversibilité mécanique est grande, et réciproquement, plus la vitesse de transfert d'énergie est petite (infiniment lente), plus l'opération est réversible<sup>12</sup>.

En fait, les phénomènes irréversibles sont liés à l'existence d'un déséquilibre. A vitesse infiniment lente, chaque transformation thermodynamique est considérée comme un nouvel état d'équilibre ; il n'y a donc pas d'irréversibilité, car il n'y a pas de déséquilibre.

---

<sup>12</sup> Pour des exemples voir Borel (1991), pp. 25-30.

La vitesse n'est pas en elle-même la cause de l'irréversibilité, c'est le frottement visqueux qui est le phénomène de transformation d'énergie mécanique en énergie thermique, et cela est dû à la viscosité des particules fluides. Une partie de cette énergie thermique est considérée comme une perte, car elle n'est plus transformable en énergie mécanique.

Ceci nous amène à la notion de qualité d'une transformation d'énergie. Chaque opération mécanique produit des frottements, c'est-à-dire une transformation d'énergie mécanique en énergie thermique. Comme il est plus facile de transformer de l'énergie mécanique en énergie thermique que l'inverse, l'énergie mécanique est dite plus noble que l'énergie thermique. Nous dirons aussi que le phénomène de diminution de qualité d'énergie, dû au frottement, est un phénomène de dissipation d'énergie.

Pour les opérations thermiques, le phénomène de diminution de qualité est dû à la chute de température entre la source chaude extérieure et le système auquel le transfert-chaaleur est appliqué. Cette différence de température est obligatoire pour que le transfert s'opère spontanément (principe zéro de la thermodynamique) à une « vitesse plus élevée qu'infiniment lente », vitesse à laquelle aucune différence de température n'est nécessaire. On peut comprendre que plus la température d'une source d'énergie est élevée, plus il est facile d'en tirer de l'énergie et plus le transfert d'énergie sera rapide. Nous dirons, par similitude aux opérations mécaniques, que le phénomène de diminution du « niveau » d'un transfert d'énergie accompagnant le transfert-chaaleur est un phénomène de dévaluation de l'énergie.

Au même titre qu'il a été nécessaire de définir l'enthalpie avant de parler du premier principe de thermodynamique, nous devons parler maintenant de l'entropie pour pouvoir définir le deuxième principe de thermodynamique.

L'entropie est le terme central de la deuxième loi. Pour décrire l'évolution d'un système thermodynamique, nous pouvons utiliser la fonction d'état d'entropie,

$$dS = \delta S^q + \delta S^m + \delta S^r + \delta S^t + \delta S^j \quad \text{éq. 11}$$

avec  $dS$  : variation de l'entropie du système,

$\delta S^q$  : contribution due aux transferts-chaaleur entre le système et l'extérieur,

$\delta S^m$  : contribution due aux transferts de masse entre le système et l'extérieur,

$\delta S^r$  : contribution due à une dissipation interne, c'est-à-dire à un frottement interne,

$\delta S^t$  : contribution due à une dévaluation interne, c'est-à-dire à un transfert-chaueur avec chute de température,

$\delta S^j$  : contribution due à toutes les autres irréversibilités internes, liées notamment aux phénomènes de diffusion, de réaction chimique et de conduction électrique.

Nous pouvons représenter un système à température uniforme par la figure suivante :

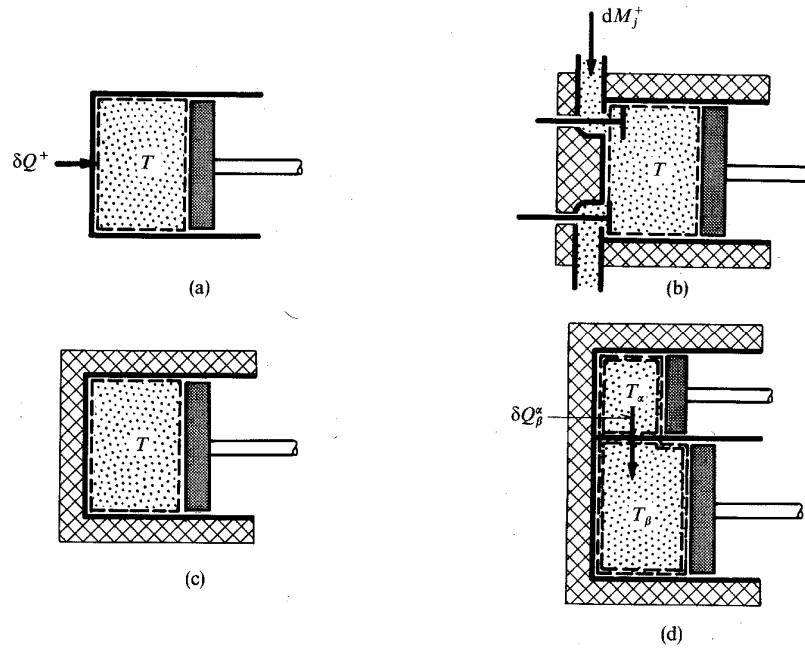


Figure 2 : Système thermodynamique typique

La contribution due aux transferts-chaueur (Figure 2 (a)) entre le système et l'extérieur est définie comme :

$$\delta S^q = \frac{\delta Q^+}{T}$$

équ. 12

Avec  $\delta Q^+$  : énergie-chaueur reçue par le système de l'extérieur, c'est-à-dire l'énergie-chaueur traversant la frontière du système,

$T$  : fonction d'état intensive dépendant de la température du système, appelée température thermodynamique.

C'est avec cette relation que R. Clausius, en 1865, a introduit le concept d'entropie.

La contribution due au transfert de masse est représentée par la Figure 2 (b) et est définie par la relation :

$$\delta S^m \equiv s_j \cdot dM_j^+ \quad \text{équ. 13}$$

où  $s_j$  : entropie massique de la substance j,

$dM_j^+$  : masse de la substance j reçue par le système de l'extérieur, c'est-à-dire masse de la substance j traversant la frontière du système.

Cette augmentation d'entropie est due aux opérations internes suivantes :

- mélange, qui est assimilable à une dissipation interne,
- dévalorisation interne.

La partie (c) de la même figure, représente un système monophasé dont l'augmentation d'entropie, due à une dissipation interne, est définie par :

$$\delta S^r \equiv \frac{\delta R}{T} \quad \text{équ. 14}$$

avec  $\delta R$  : énergie mécanique (travail des forces de viscosité) transformée en énergie thermique par le phénomène de dissipation interne,

$T$  : température thermodynamique à laquelle s'opère la dissipation interne.

L'augmentation d'entropie due à la dévalorisation de la température est illustrée dans la partie (d) et est, après simplification<sup>13</sup>, définie par :

$$dS^t = \left( \frac{1}{T_\beta} - \frac{1}{T_\alpha} \right) \cdot \delta Q_\beta^\alpha \quad \text{équ. 15}$$

---

<sup>13</sup> Voir [Borel (1991), page 35].

avec  $\delta Q_{\alpha\beta}^{\alpha}$  : énergie-chaueur passant de la phase  $\alpha$  à la phase  $\beta$  du système,

$T_{\alpha}, T_{\beta}$  : température thermodynamique des phases  $\alpha$  et  $\beta$  du système.

D'une manière générale, un système quelconque, constitué d'un certain nombre de phases subissant la somme des opérations mentionnées précédemment, a un taux de variation dans le temps de l'entropie donné par les relations :

$$\begin{aligned} \frac{dS}{dt} &= \dot{S}^e + \dot{S}^i \quad \begin{cases} \dot{S}^e = \dot{S}^q + \dot{S}^m \\ \dot{S}^i = \dot{S}^r + \dot{S}^t + \dot{S}^j \end{cases} \\ \dot{S}^q &= \sum_A \left[ \int \left( \frac{\delta \dot{Q}_A^+}{T_A} \right) \right] \quad \dot{S}^m = \sum_j [s_j \cdot \dot{M}_j^+] \\ \dot{S}^r &= \sum_A \left[ \int \left( \frac{\delta \dot{R}_A}{T_A} \right) \right] \quad \dot{S}^t = \sum_{AB} \left[ \int \left( \frac{1}{T_B} - \frac{1}{T_A} \right) \cdot \delta Q_B^A \right] \end{aligned} \quad \text{éq. 16}$$

où A et B désignent deux parties du système thermodynamique à températures non uniformes et  $T_A$  et  $T_B$  représentent les températures de ces parties.

D'un point de vue conceptuel, Prigogine et Stengers (1986) ont démontré que l'entropie, pour la physique, est un indicateur d'évolution (une justification de l'existence du temps en physique). Dans le cas d'un système isolé, seuls subsistent les termes qui concernent la production, soit  $\delta S^r$ ,  $\delta S^t$ ,  $\delta S^j$ , et l'entropie du système ne peut dès lors qu'augmenter ou rester constante. Il n'est plus question ici des transformations irréversibles en tant qu'approximation de transformations réversibles, la croissance de l'entropie désigne une évolution spontanée du système. L'entropie devient ainsi un « indicateur d'évolution » et introduit en physique une « flèche de temps » : pour tout système isolé, le futur est la direction dans laquelle l'entropie augmente (Prigogine et Stengers (1986)).

Ayant défini l'entropie, nous avons maintenant les outils nécessaires pour exposer la deuxième loi de la thermodynamique.

La deuxième loi de la thermodynamique, aussi appelée la loi d'entropie, a été pressentie dès 1824 par l'ingénieur français N.S. Carnot. Il cherchait une expression générale pour connaître la quantité maximum de travail (mécanique) que peut fournir un moteur thermique. Il a démontré que si une machine fournit du travail mécanique au cours d'un cycle, elle échange nécessairement de la chaleur avec deux sources de température différentes.

Carnot, en 1824, a prédit l'énoncé de Kelvin-Planck qui, en 1852 (Kelvin (1852)), a établi l'un des énoncés du second principe.

*Second principe de la thermodynamique (Énoncé de Carnot) : une machine thermique cyclique ne peut fournir du travail physique que si, et seulement si, elle échange de la chaleur avec deux sources de températures différentes.*

*Second principe de la thermodynamique (Énoncé de Kelvin-Planck) : il n'est pas possible de construire une machine qui, au bout d'un cycle, puisse produire du travail mécanique en utilisant la seule chaleur prise à cette source.*

L'énoncé entropique de Clausius<sup>14</sup> en 1850 a introduit la notion d'entropie. Grâce à ses travaux ont pu formuler la deuxième loi :

*La variation d'entropie d'un système thermodynamique quelconque, due aux opérations internes, ne peut être que positive ou nulle.*

Nous avons vu que le premier principe ne prend pas en compte la notion de qualité de l'énergie, ni de son niveau (chute de température). Il ne tient compte que des transferts d'énergie entre le système et l'extérieur.

Les problèmes de l'irréversibilité de certains processus et de perte de niveau de température ont aussi été mis en évidence. Le deuxième principe tient compte de ces deux problèmes et va donner un sens privilégié aux processus de transformation. De plus, en fonction du point de vue choisi, il permet de mettre en évidence les propriétés de certains cycles thermodynamiques, en particulier du cycle de Carnot, et donc de tenir compte de la perte de niveau (thermique) des énergies considérées.

---

<sup>14</sup> Il existe deux énoncés de Clausius. Seul le deuxième est présenté ici.

Sur la base des définitions données plus haut, l'énoncé du deuxième principe se traduit mathématiquement par l'inégalité :

$$\delta S^i \geq 0$$

équ. 17

dans laquelle :

le signe > correspond aux opérations irréversibles,

le signe = correspond aux opérations réversibles.

Nous avons vu que pour être réversible, un processus doit être infiniment lent, afin de ne pas créer d'entropie. Ce type de processus (idéal) ne se rencontre pratiquement jamais. Dans la réalité, l'égalité de l'équation 13 n'existe pas. L'entropie est donc bien un indicateur d'irréversibilité.

#### 2.2.4 Le bilan exergétique<sup>15</sup>

Nous avons vu que l'approche énergétique, basée sur le premier principe de thermodynamique, posait des problèmes dans certains cas, entre autres pour les thermopompes. Cette approche est inadéquate pour caractériser les notions de qualité et de niveau de l'énergie, ainsi que celles de perte et de rendement thermodynamiques. Dans l'approche exergétique, nous allons à la fois intégrer le premier et le second principe.

L'exergie est définie comme le travail potentiel qui peut être extrait d'un système. C'est la partie utile de l'énergie.

La méthode pour passer du bilan énergétique au bilan exergétique correspondant s'opère de la façon suivante :

1. On conserve les énergies dites nobles (mécaniques, électriques,...).
2. On passe d'une énergie-chaleur  $Q$  au cotravail<sup>16</sup>-chaleur  $E_q$  correspondant, en multipliant  $Q$  par le facteur de Carnot  $\Theta$ . Le cotravail-chaleur  $E_q$  est l'énergie noble

---

<sup>15</sup> Dans certains ouvrages, on l'appelle aussi le bilan entropique.

<sup>16</sup> Le préfixe « co » signale le passage du premier au deuxième principe, réalisé, dans ce cas, par la multiplication du facteur de Carnot. Ce préfixe a été introduit par Borel (1991) afin de faciliter la compréhension du bilan exergétique. Peu d'auteurs utilisent des termes pour présenter la notion exergétique, on trouve dans la littérature le terme « exergie-chaleur » qui se distingue du terme

maximale qu'il serait théoriquement possible d'obtenir à partir d'une énergie-chaueur  $Q$ , à l'aide d'un cycle parfait (réversible) fonctionnant entre les températures  $T$  et  $T_a$ . Il exprime la potentialité d'une chaleur quant à la production de travail.

3. On passe d'une énergie-transformation  $W$  au cotravail-transformation  $E_w$  correspondant, en remplaçant l'énergie interne effective  $U_e$  du système par la coénergie, et en remplaçant l'enthalpie massique d'un corps entrant ou sortant du système par la coenthalpie massique. Le cotravail-transformation  $E_w$  est l'énergie noble maximale qu'il serait théoriquement possible d'obtenir à partir d'une énergie-transformation  $W$  à l'aide d'une transformation parfaite (réversible). Il exprime la potentialité d'un corps quant à la production de travail.
4. On passe d'une perte énergétique nulle (conservation de l'énergie) à la perte exergétique  $L$ , obtenue en multipliant la création d'entropie  $S^i$  due aux irréversibilités internes du système par la température de l'atmosphère. La perte exergétique  $L$  est la diminution de l'énergie noble obtenue à partir d'un système par rapport à l'énergie noble maximale qu'il serait théoriquement possible d'obtenir à l'aide d'opérations parfaites (réversibles). Elle exprime la perte d'un système quant à la production de travail.

La formulation mathématique est présentée ci-dessous.

La puissance travail est égale au travail mécanique reçu par le système :

$$E_e^+ = W^+ \quad \text{éq. 18}$$

Pour passer d'une énergie-chaueur à un cotravail-chaueur<sup>17</sup>

$$E_q^+ \equiv \int \Theta \cdot \delta Q^+ \quad \text{éq. 19}$$

avec  $\Theta$  le facteur de Carnot.

---

« énergie-chaueur ». Convaincu que le terme « co » permet une distinction claire entre le bilan énergétique et le bilan exergétique, nous l'avons donc gardé.

<sup>17</sup> Appelé aussi exergie-chaueur

$$\Theta \equiv 1 - \frac{T_a}{T} \quad \text{éq. 20}$$

où  $T_a$  : température de l'atmosphère

$T$  : température de la source chaude

Pour passer de l'énergie-transformation au cotravail-transformation<sup>18</sup> :

$$E_w^+ \equiv \sum_j \left[ \int k_{czj} \cdot dM_j^+ \right] - \Delta J_{cz} \quad \text{éq. 21}$$

avec  $k_{czj}$  la coenthalpie totale massique :

$$k_{cz} \equiv h_{cz} - T_a \cdot s \quad \text{éq. 22}$$

et  $J_{cz}$  représente la coénergie totale :

$$J_{cz} \equiv U_{cz} - T_a \cdot S \equiv U_{cz} + P_a \cdot V - T_a \cdot S \quad \text{éq. 23}$$

Pour passer des pertes énergétiques nulles à des pertes exergetiques  $L$  :

$$L \equiv T_a \cdot S^i \geq 0 \quad \text{éq. 24}$$

$L$  est toujours positive, car  $T_a$  et  $S^i$  sont positifs.

Cela nous permet de donner l'expression générale du bilan exergetique en puissance :

$$\sum_k [\dot{E}_{ek}^+] + \sum_i [\dot{E}_{qi}^+] + \sum_n [\dot{E}_{wn}^+] = \dot{L} \geq 0 \quad \text{éq. 25}$$

avec  $\dot{E}_{ek}^+$  : puissance-travail effective, reçue par le système au niveau de la machine  $k$ ,

$\dot{E}_{qi}^+$  : copuissance-chaleur reçue de la source à température  $T_i$ ,

$\dot{E}_{wn}^+$  : copuissance-transformation reçue au niveau du réseau d'écoulement  $n$ ,

$\dot{L}$  : perte exergetique globale, en puissance.

---

<sup>18</sup> Aussi appelé exergie-transformation.

Pour conclure sur l'approche exergetique, il faut encore parler du rendement, qui est le rapport des copuissances donnees par le systeme et des copuissances reues par le systeme, soit :

$$\eta = \frac{\sum_k [\dot{E}_{ek}^-] + \sum_i [\dot{E}_{qi}^-] + \sum_n [\dot{E}_{wn}^-]}{\sum_k [\dot{E}_{ek}^+] + \sum_i [\dot{E}_{qi}^+] + \sum_n [\dot{E}_{wn}^+]} \quad \text{éq. 26}$$

En fait, le dénominateur n'est rien d'autre que le numérateur auquel on additionne les pertes exergetiques. Comme ces dernières sont toujours positives :

$$0 \leq \eta \leq 1 \quad \text{éq. 27}$$

L'approche exergetique permet donc de résoudre les problèmes posés par l'approche énergétique.

L'introduction du deuxième principe a des implications économiques fondamentales, car il met en évidence l'existence d'une énergie « utile » appelée l'exergie, qui est un bien rare, qui se consomme et est donc épuisable. Le traitement de ce bien rare dans le cadre de la théorie économique est tout particulièrement intéressant, en particulier pour ce qui est de la construction des prix, comme nous le verrons au Chapitre 3.

Dans les pages qui suivent, comparons différents systèmes, sous l'angle énergétique et exergetique. Cette partie « vulgarise » l'approche de la théorie de la thermodynamique.

### 2.2.5 Illustration de l'utilité de l'approche exergetique

Borel (1988) donne quelques exemples de l'utilité de l'approche exergetique en débutant par le chauffage électrique.

#### Le chauffage électrique

Le chauffage électrique est un processus qui transforme de l'énergie noble (électricité) en énergie thermique à basse température. Si l'on applique le premier principe, l'efficacité (énergétique) de la transformation est de 100 %. Avec le deuxième principe, le rendement (exergetique) n'est plus que de 7 %, obtenu en utilisant la T° du local à 20°C et de l'atmosphère à T<sub>a</sub> = 0°C. Nous avons vu que la coénergie chaleur est donnée par :

$$E_q^+ = \left(1 - \frac{T_a}{T}\right) \cdot Q^+$$

Sur cette base, le rendement exergetique du chauffage électrique est égal à 7%.

L'approche humoristique de Borel nous semble un bon moyen de comprendre le pourquoi de cette diminution. Borel illustre en effet son propos ainsi :

- petit bonhomme → unité d'énergie-chaleur,
- altitude → facteur de Carnot  $\Theta$ ,
- association d'un petit bonhomme et de son altitude → cotravail-chaleur.

Pour le cas du chauffage électrique direct, le modèle est :

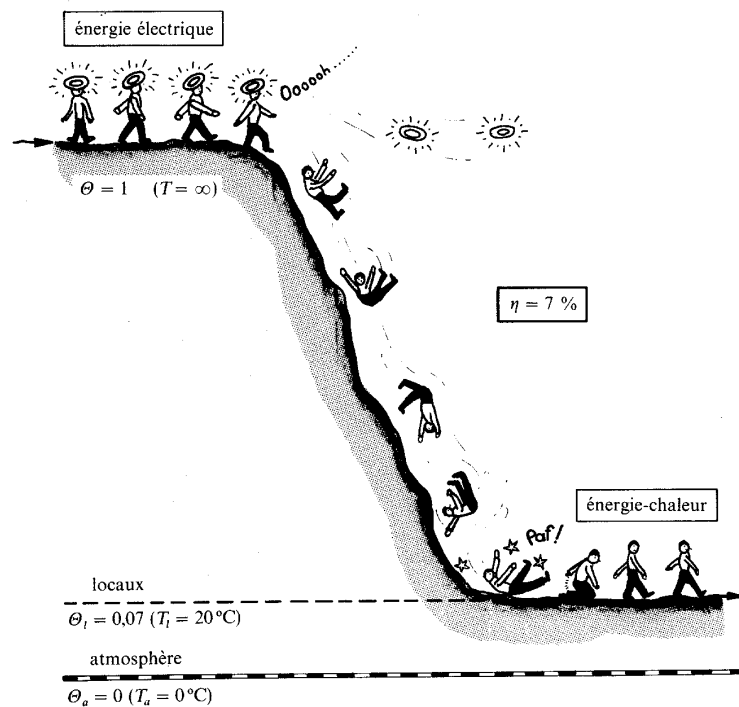


Figure 3 : chauffage électrique

Dans ce modèle, le transfert d'énergie électrique, comme tout transfert d'énergie dite noble, est assimilé à un transfert d'énergie-chaleur à température infinie ( $\Theta = 1$ ). De plus, si l'on introduit la vitesse de déplacement des petits bonhommes, il est possible de passer du cotravail-chaleur à la copuissance-chaleur. Borel dit de ce modèle qu'il « peut sembler puéril aux yeux des lecteurs déjà initiés aux subtilités de la thermodynamique.[...] Si nous nous hasardons à le présenter dans un ouvrage scientifique, c'est que l'expérience montre qu'il possède certaines vertus pédagogiques » (Borel (1991)).

Le lecteur a pu remarquer que la noblesse d'un transfert d'énergie est symbolisée par des auréoles, et que ces dernières sont perdues au cours du chauffage électrique direct. L'efficacité est égale  $\varepsilon = 100 \%$ , car le nombre de bonshommes qui sortent du système est identique à celui qui entre dans le système.

### Le cycle bitherme moteur

Le seul cycle bitherme moteur que nous allons traiter est celui qui utilise l'atmosphère comme source froide. Un cycle bitherme moteur est caractérisé par le fait qu'il consomme de l'énergie-chaleur  $q_c^+$  (source chaude), fournit de l'énergie-travail  $e^-$  et donne de l'énergie-chaleur dévaluée  $q_a^-$  à la source froide, ici l'atmosphère.

L'illustration humoristique est :

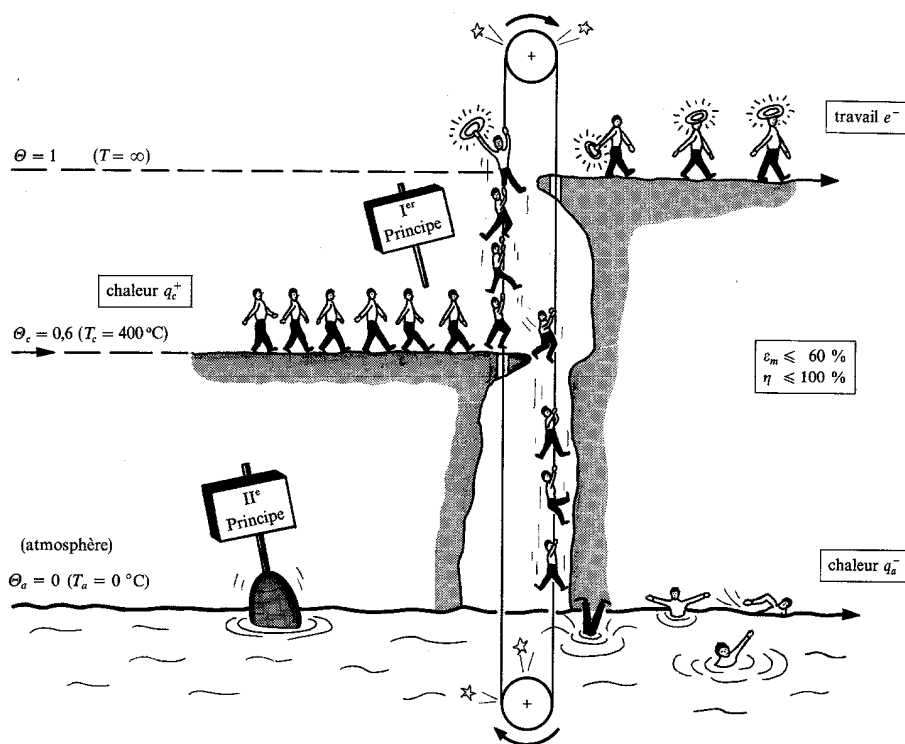


Figure 4 : cycle moteur

Ici les bonshommes peuvent changer d'altitude à l'aide d'une corde sans fin qui s'enroule autour de deux poulies. La condition pour que certains bonshommes se fassent monter de  $\theta_c=0.6$  à  $\theta=1$  en s'agrippant à la partie gauche de la corde est que d'autres bonshommes descendent de  $\theta_c = 0.6$  à  $\theta_a = 0$  en s'agrippant à la partie droite de la corde. Cela illustre le

fait que l'ennoblissement d'une partie de l'énergie-travail se paie par la dévalorisation de l'autre partie.

Nous pouvons distinguer deux cas de figure :

1. soit le moteur est réversible, dans ce cas il n'y a aucun frottement, et donc le nombre de petits bonshommes doit être le même du côté droit et du côté gauche,
2. soit le moteur est irréversible, dans ce cas il y a des frottements dans les paliers des arbres supportant les poulies. Ici les petits bonshommes qui descendent doivent être plus nombreux que ceux qui montent.

L'efficacité motrice sous forme massique est donnée par la relation :

$$\varepsilon_m \equiv \frac{e^-}{q_c^+}$$

équ. 28

où  $q_c^+$  l'énergie-chaleur reçue de la source chaude,

$e^-$  l'énergie-travail fournie.

Comme

$$e^- = q_c^+ - q_a^-$$

équ. 29

où  $q_a^-$  est l'énergie-chaleur rejetée dans l'atmosphère,

nous pouvons écrire

$$0 \leq \varepsilon_m = 1 - \frac{q_a^-}{q_c^+} \leq 1$$

équ. 30

Le rendement exergetique est, quant à lui, défini sous forme massique, par

$$\eta \equiv \frac{e^-}{e_{qc}^+} \leq 1$$

équ. 31

avec  $e_{qc}^+$  le cotravail-chaleur consommé.

Avec l'équ. 25 nous pouvons écrire

$$\eta = 1 - \frac{1}{e_{qc}^+} \leq 1$$

équ. 32

donc le rendement exergetique est toujours inférieur à 1.

### Le cycle bitherme thermopompe

Le cycle bitherme thermopompe consomme de l'énergie-travail  $e^+$ , prend de l'énergie-chaleur à la source froide  $q_a^+$  et fournit de l'énergie-chaleur à la source chaude  $q_c^-$ .

Le modèle humoristique est :

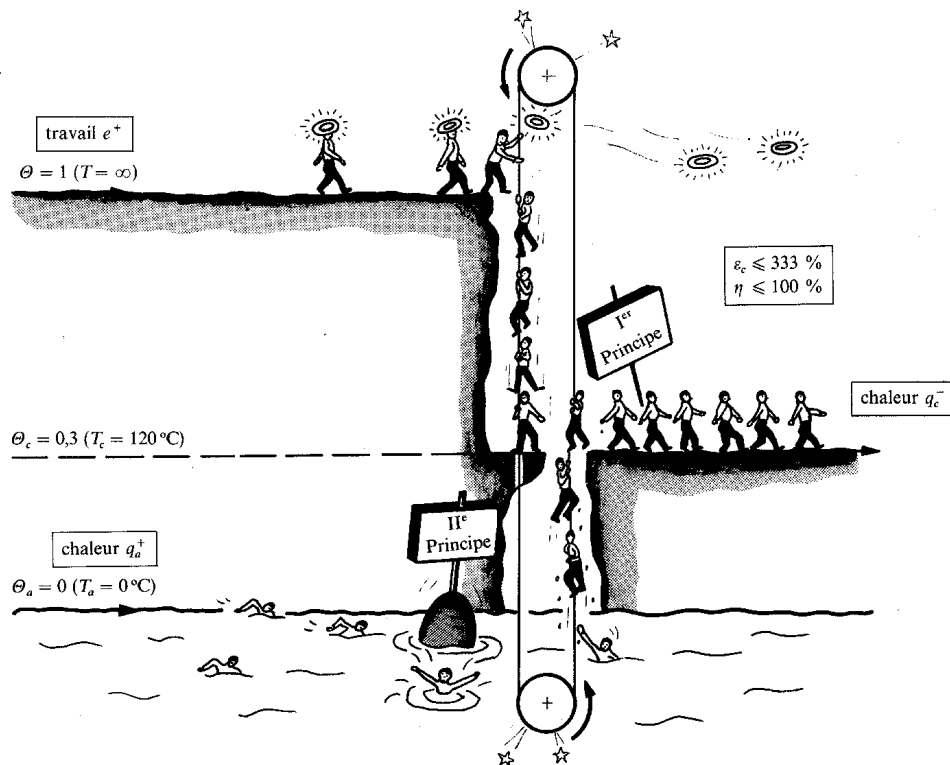


Figure 5 : cycle thermopompe

Cette fois-ci, la corde sans fin tourne dans le sens inverse que le cycle bitherme. Il faut plus de petits bonshommes sur la partie gauche que sur la partie droite, ceci afin que ceux qui montent du niveau  $\Theta_a = 0$  au niveau  $\Theta_c = 0.3$  soient plus légers que ceux qui descendent du niveau  $\Theta_a = 1$  au niveau  $\Theta_a = 0.3$ . La valorisation de l'énergie-chaleur doit se payer par une dégradation d'énergie-travail et d'énergie-chaleur.

Dans ce cas il y a aussi deux cycles, le réversible et l'irréversible, et pour la même raison : l'apparition ou non de frottement.

L'efficacité du cycle thermopompe est donnée par la relation

$$\varepsilon_c \equiv \frac{q_c^-}{e^+} \quad \text{éq. 33}$$

Comme

$$e^+ = q_c^- - q_a^+ > 0 \quad \text{éq. 34}$$

nous pouvons écrire

$$\varepsilon_c = 1 + \frac{q_a^+}{e^+} > 1 \quad \text{éq. 35}$$

Nous constatons que l'efficacité est plus grande que 1 donc plus grande que 100 % !

Le rendement d'un cycle thermopompe est donné par la relation

$$\eta \equiv \frac{e_{qc}^-}{e^+} \quad \text{éq. 36}$$

avec A-2 nous pouvons réécrire

$$\eta = 1 - \frac{l}{e^+} \leq 1 \quad \text{éq. 37}$$

Donc nous avons un rendement exergetique plus petit que 1, donc plus petit que 100 %, résultat plus conforme à nos attentes.

## Le cycle frigopompe

Le cycle frigopompe est similaire au cycle précédent, à l'exception que la source chaude est ici l'atmosphère.

Le modèle humoristique est donné par :

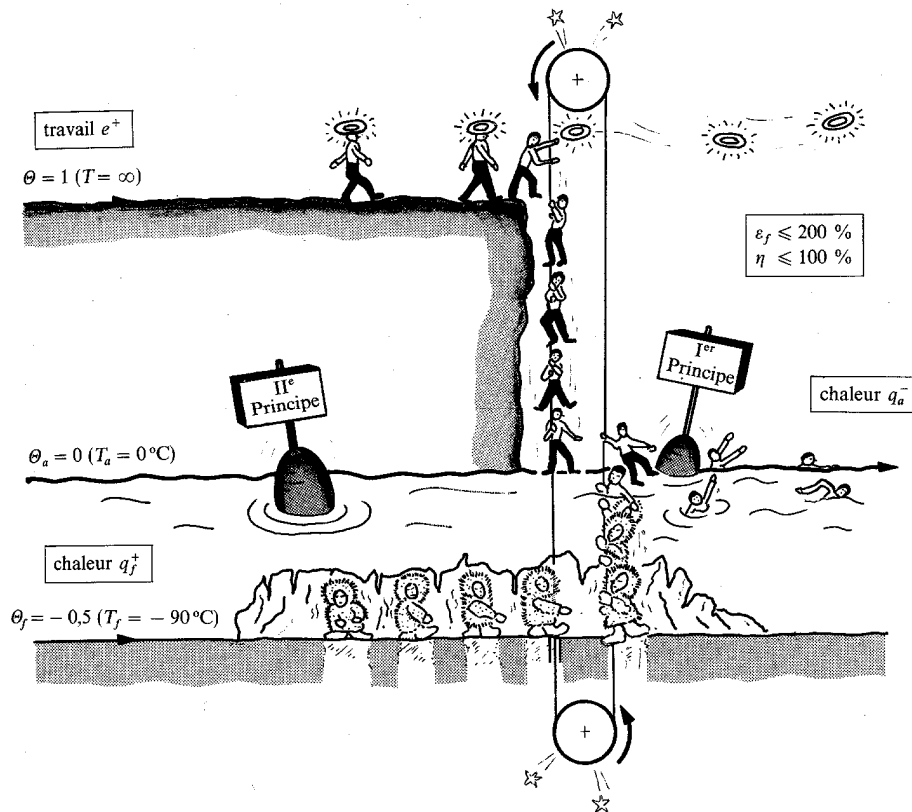


Figure 6 : cycle frigopompe

L'efficacité de la réfrigération est exprimée par la relation

$$\epsilon_f \equiv \frac{q_f^+}{e^+} \quad \text{équ. 38}$$

Comme

$$e^+ = q_a^- - q_f^+ > 0 \quad \text{équ. 39}$$

alors

$$\varepsilon_f = \frac{q_a^-}{e^+} - 1$$

équ. 40

Le résultat peut être inférieur ou supérieur à 1, selon les cas considérés.

Le rendement du cycle de la frigopompe est défini par la relation

$$\eta \equiv \frac{e_{cf}^-}{e^+} \leq 1$$

équ. 41

avec A-2, on obtient

$$\eta = 1 - \frac{I}{e^+} \leq 1$$

équ. 42

Cette formulation a déjà été rencontrée dans les exemples précédents. Ici aussi le résultat obtenu pour le rendement est plus conforme que celui de l'efficacité.

Nous présentons ci-après les travaux utilisant la théorie de la thermodynamique dans l'économie.

### 2.2.6 L'utilisation de la théorie de la thermodynamique en économie

Le point de départ de cette partie est un travail effectué à l'Université de Versailles en 1994 par Van Den Heuvel (1994). Comme l'auteur a basé sa recherche sur l'utilisation de la thermodynamique et du terme d'entropie en économie de l'environnement, nous l'avons complétée par différentes études publiées par la suite, et par d'autres, concernant l'économie en général, Bruggink (1985), Faber *et al.* (1987), Kummel *et al.* (2000), Pasquier (1997), Reistad (1975), Schaeffer et Wirtshafter (1992), Rosen (1992), Borel (1991), Wall *et al.* (1994), Ayres (1996), Daly (1992), Pigou (1935), Georgescu-Roegen (1976), Proops (1985), Dyke (1994), O'Connor (1991).

Comme nous l'avons déjà dit dans l'introduction, nous allons suivre la classification de Bruggink (1985), qui distingue les approches empiriques et paradigmatiques.

#### Les approches empiriques

L'approche empirique cherche à construire des indicateurs ou des outils qui se basent sur la théorie de la thermodynamique. Nous avons trouvé des articles qui traitent, entre autres, d'outils (indicateurs) de mesure de pollution, d'efficacité du système énergétique d'un pays.

Tous ces articles ont en commun une certaine méthode, ils définissent une approche théorique et tentent, avec des séries de données, d'estimer la valeur de certains paramètres ou autres indicateurs. Ici la notion d'empirisme fait référence à « mesure ».

Dans la première famille de travaux analysés, nous pouvons relever l'école néo-autrichienne qui « relie les sciences de la nature et les considérations économiques en établissant les relations entre système économique et système environnemental »<sup>19</sup> (Faber *et al.* (1987)), et en particulier la construction d'un indicateur de pollution pour la modélisation macro-économique par Kummel *et al.* (2000), qui interprète la fonction de pollution en termes réels et s'intéresse à l'impact de cette pollution sur la croissance. Il construit en plus un indicateur entropique spécifique de pollution. La construction de cet indicateur se fonde sur un monde où toutes les pollutions peuvent être transformées en pollution thermique : l'analyse énergétique et l'analyse extropique. « La première est basée sur les résultats d'études effectuées en écologie, alors que la seconde est inspirée de recherches menées en thermodynamique des systèmes non-linéaires » (Pasquier (1997)).

La deuxième famille des approches empiriques analysées fait référence au système énergétique d'un pays, c'est-à-dire l'analyse annuelle des consommations d'énergie permettant la tenue d'une comptabilité énergétique, à partir de laquelle on peut établir le bilan énergétique, si l'on s'intéresse à l'analyse quantitative de l'énergie. Dans la mesure où c'est l'analyse qualitative de l'énergie qui nous intéresse, il est possible de faire un bilan exergétique.

L'approche de Reistad (1975) ne considère que les flux des porteurs d'énergie. De plus, l'utilisation finale de l'énergie est divisée en trois secteurs : l'industrie, le transport et le secteur commercial et résidentiel. Chez d'autres auteurs, le secteur de l'énergie, incluant le raffinage du pétrole, la production d'électricité et la distribution, est traité de manière séparée. Ces travaux sont :

- Schaeffer et Wirtshafter (1992) pour le Brésil,
- Rosen (1992), qui examine l'efficacité énergétique du Canada,
- Borel (1991) pour la Suisse.

---

<sup>19</sup> Traduit par Van den Heuvel (1994).

L'approche de Wall *et al.* (1994) considère tous les types de flux d'énergie et de matériaux. Parallèlement aux porteurs d'énergie, ces flux englobent le bois destiné aux matériaux de construction et à l'industrie du papier, la nourriture et le fourrage, le pétrole et le gaz pour l'industrie pétrochimique, les minerais ainsi que les produits de ces matières premières. L'utilisation finale est généralement détaillée dans une variété de secteurs. Cette méthode exige davantage de statistiques détaillées. Wall *et al.* (1994) ont appliqué cette méthode sur l'Italie.

Une comparaison de ces études, Genoud (1998), nous a permis de mettre en évidence plusieurs différences importantes entre les pays, liées entre autres aux conditions climatiques. La comparaison des résultats obtenus n'est pas toujours pertinente, il faut d'abord connaître les hypothèses servant de base aux travaux de recherche.

Une autre approche empirique originale permet de faire le lien entre le prix et le niveau de  $T^\circ$  théorique qu'il est possible d'obtenir d'une source énergétique. Au Chapitre 4 nous présenterons en détail cette approche.

En conclusion des approches empiriques, nous distinguons deux limites :

1. l'existence ou non de conditions d'application des théories physiques utilisées,
2. la difficulté de mise en œuvre pratique de ces différentes approches, les données nécessaires n'étant pas toujours disponibles.

Ces deux limites sont particulièrement contraignantes pour les approches écologiques. Par contre, en ce qui concerne les bilans de systèmes énergétiques, les données semblent plus disponibles, ce qui permettrait de systématiser ce type de démarche pour comparer les chaînes énergétiques des pays.

### Les approches paradigmatiques

Dans cette partie nous nous intéressons à certaines utilisations de la thermodynamique et de l'entropie en économie qui peuvent être classées en deux familles.

La première est celle issue des recherches effectuées par le précurseur, Georgescu Roegen, introduisant le concept de bioéconomie. En 1967, cet auteur s'est concentré sur la thermodynamique comme une loi d'une métamorphose du déclin inévitable (Ayres (1996)). Bien d'autres, comme Daly (1992), qui fut l'élève de Georgescu-Roegen, lui ont ensuite emboîté le pas. Ils critiquent l'école économique néoclassique, car l'objectif de cette dernière était de construire une science économique d'après le modèle de la mécanique. Et, « dans

un état stationnaire, les facteurs de production sont des stocks, immuables en quantité, d'où sort un flux continu de revenu réel, également immuable en quantité » (Pigou (1935)).

D'après Georgescu-Roegen, il y a deux sources d'énergie utilisables par l'homme :

1. l'énergie stockée dans les entrailles de la terre,
2. le flux d'énergie émis par les rayons du soleil.

Il précise que « l'homme a une maîtrise presque complète de la dote terrestre [...], mais il n'a pas le contrôle du flux du rayonnement solaire, à des fins pratiques » (Georgescu-Roegen (1976)). Il précise encore que la croissance industrielle est limitée par le stock terrestre plutôt que par le flux solaire. Il considère donc la terre comme un système isolé du flux solaire, sans échange possible avec ce dernier.

Cette hypothèse a été largement critiquée par beaucoup d'auteurs, comme Ayres (1996) qui considère que la Terre n'est pas un système isolé du soleil. Le soleil permet un apport considérable d'énergie et donc de basse entropie. L'auteur précise que seule une petite partie de l'énergie de l'astre est réellement utilisée. Il donne comme exemple le métabolisme d'une plante qui n'utilise que 3 à 5 % de l'énergie solaire reçue par la surface de la terre. D'ailleurs, Georgescu-Roegen est en partie d'accord avec cette vue, car il écrit : « le stock terrestre [d'énergie] est une piètre source au regard de celle constituée par le soleil, [...] le stock terrestre tout entier ne pourrait fournir que quelques jours de lumière solaire » (Georgescu-Roegen (1976)).

Ayres précise encore que la technologie, qui permettrait d'utiliser l'énergie solaire reçue sur terre, existe, mais n'est pas compétitive alors que dans un futur proche, les coûts relatifs de mise en œuvre de ces technologies devraient chuter.

Georgescu-Roegen, et la mouvance qui l'a suivi, ont une vue très pessimiste de l'évolution de la planète. Cette dernière est due, en partie, aux conditions limites que ces auteurs considèrent. Ils supposent que le monde est un système isolé, c'est-à-dire sans transfert de masse, ni d'énergie, ce qui implique que la seule basse entropie utilisable est celle qui est stockée dans la croûte terrestre ou dans la mer. Le flux d'énergie issu du soleil n'est, d'après eux, inutilisable.

Nous pensons que cette vue est réductrice, car si aujourd'hui il n'est économiquement pas rentable de substituer de l'énergie « stock » par de l'énergie « flux », ceci est uniquement dû

a un processus d'optimisation économique, qui veut que l'on utilise d'abord les énergies meilleur marché<sup>20</sup>, qui sont aujourd'hui les énergies « stock ».

La deuxième famille d'approches paradigmatiques utilise la thermodynamique loin de l'équilibre dans le cadre des recherches sur l'économie dissipative et auto-organisatrice.

Nous avons relevé trois études dans ce domaine.

Proops (1985) suggérait « que pour affronter le problème de la nature physique de l'activité économique, en particulier pour ce qui est de la dissipation d'énergie par les économies et [le problème de] la tendance [des économies] à évoluer vers des états de complexité physique et organisationnelle plus élevées »<sup>21</sup>, il serait intéressant de faire appel aux concepts de la thermodynamique ouverte, loin de l'équilibre, et ceci pour plusieurs raisons :

1. comme nous sommes dans un environnement ouvert, il n'est pas possible d'utiliser la thermodynamique de l'équilibre,
2. « l'hypothèse selon laquelle la seconde loi de la thermodynamique serait une contrainte à l'activité économique pourrait ne pas être utile, voire même ne pas être vraie » (Proops (1985)),
3. « comme l'a remarqué Georgescu-Roegen, les activités économiques échangent de l'énergie et de la matière avec leur environnement ; elles sont pour cette raison mieux représentées par des systèmes thermodynamiques ouverts » (Proops (1985)).

Il précise encore que « l'observation montre que les économies sont dissipatives et auto-organisatrices, bien que l'analyse et l'économie énergétiques se soient concentrées sur la dissipation et aient largement ignoré l'auto-organisation. Une meilleure compréhension de la première pourrait peut-être provenir de la reconnaissance de la seconde » (Proops (1985)).

« Proops veut en fait dépasser la simple analogie, il prône l'adoption de la théorie des structures dissipatives comme modèle physique pour représenter le fonctionnement des économies » (Van Den Heuvel (1994)).

---

<sup>20</sup> Le coût d'un kWh issu du pétrole est environ 5 fois moins élevé que le coût d'un kWh issu d'un panneau solaire.

<sup>21</sup> Traduit par Van Den Heuvel (1994).

Dyke (1994) a une démarche proche de Proops. Il a démontré pourquoi les systèmes économiques peuvent être considérés comme des structures dissipatives.

O'Connor (1991) va poursuivre une voie un peu différente de Dyke en s'intéressant plus particulièrement à « l'analyse du changement organisationnel des systèmes sociaux, à la lumière de la théorie des structures dissipatives » (Van Den Heuvel (1994)).

Ces trois approches confortent la pertinence de l'approche de la thermodynamique de Prigogine et Stengers. Il semble qu'il ne soit pas possible de se passer de la thermodynamique loin de l'équilibre, non linéaire, et donc des structures dissipatives, pour analyser un système économique quel qu'il soit.

Dyke (1994) et O'Connor (1991) estiment que la seule utilisation possible de la thermodynamique loin de l'équilibre ne peut être que de type analogie paradigmatique, et que tout calcul est voué à l'échec.

Pour conclure la présentation des approches paradigmatiques, nous constatons que l'objectif de chacune d'elles est toujours « la construction d'une représentation du monde qui permette d'intégrer, par l'explication et la formalisation, les interrogations propres à l'insertion du système économique dans un système économie/environnement plus large et qui soit ainsi apte à aborder, en termes écologico-économiques les graves problèmes environnementaux auxquels nous devons faire face aujourd'hui » (Van Den Heuvel (1994)).

Les analogies faisant appel à la thermodynamique de l'équilibre ont les mêmes limites que les études empiriques.

Par contre, les études qui utilisent la thermodynamique loin de l'équilibre sont potentiellement intéressantes pour aborder les systèmes écologico-économiques comme des structures dissipatives. En effet, « les problèmes écologico-économiques majeurs auxquels nous avons à faire face ont les caractéristiques fondamentales d'irréversibilité, d'incertitude et de complexité. Or ces trois dimensions sont traitées au sein de l'analyse des structures dissipatives. On pourrait donc y trouver un outil heuristique apte à intégrer ces aspects dans une véritable théorie écologico-économique » (Van Den Heuvel (1994)).

### **2.3 Remarques finales du Chapitre 2**

Les travaux analysés nous ont confortés dans la pensée que la loi entropique doit prendre la place qui lui est due, en tout cas dans les analyses empiriques. C'est ce que nous tenterons de développer dans la suite.

En ce qui concerne l'utilisation de la thermodynamique en économie, il semble intéressant de poursuivre la recherche fondamentale de nos systèmes économiques, et cela d'autant plus qu'aujourd'hui nos sociétés sont confrontées à la nécessité de penser autrement pour répondre à ces grands enjeux, que sont l'épuisement des ressources, les coûts de plus en plus élevés des matières premières ou la surpopulation.



### **3 Thermodynamique et économie : vers des indicateurs de développement durable fondés sur l'exergie<sup>22</sup>**

#### **3.1 Introduction**

L'objet majeur de ce chapitre est de définir des indicateurs de développement durable qui prennent en compte les contraintes économiques liées aux principes de la thermodynamique. Tout d'abord, sur la base des études sur les relations entre l'économie et la thermodynamique proposées au Chapitre 2, le concept d'exergie est introduit comme l'irréversibilité du processus de production. Puis, un indicateur de développement durable décrivant les économies d'énergie au sein d'un agrégat macroéconomique est construit, en s'appuyant notamment sur la notion de rendement exergetique. Cet indicateur est appliqué à la production de chaleur sur la base d'une étude de cas.

Au Chapitre 2 nous avons présenté la question des relations entre le thermodynamique et l'analyse économique. Ceci est un sujet complexe n'ayant donné lieu qu'à des recherches sporadiques, tant parmi les physiciens que parmi les économistes, et surtout durant les quarante dernières années, à savoir depuis le début des années 1970. Ce domaine de transition s'est prêté, pour ainsi dire, à plusieurs niveaux de considération : un premier niveau s'est attaché au rôle des contraintes et des principes de la thermodynamique sur les contraintes de la microéconomie de la production. Cette approche a abouti à plusieurs travaux, apportant quelques aperçus intéressants sur les modèles de la microéconomie de production. Nous avons vu que ces études traitent des relations entre les principes de la thermodynamique et les concepts de l'économie de la production, telles que les fonctions de la production, de même que des relations entre la thermodynamique et les optima économiques.

Un second souci a été de relier les principes de la thermodynamique (et les contraintes qu'ils imposent) à la dynamique économique, et spécialement à la théorie de la croissance à long terme. Dans cet ordre d'idées particulier, nous avons mentionné plusieurs auteurs au chapitre 2.

---

<sup>22</sup> Publié à l'origine par la Revue suisse d'économie et de Statistique avec le titre : Ferrari, S., Genoud, S. et Lesourd, J.B , (2001), Thermodynamics and economics : Towards exergy-based indicators of sustainable development, Revue suisse d'économie et de statistique, vol 137, n° 3, Basel.

Enfin, les travaux de Georgescu-Roegen (1971, 1979), de même que quelques travaux connexes plus récents, tels que ceux de Cleveland et Ruth (1997) et de Ferrari et Lesourd (2000), s'intéressent à une troisième question : quelles sont les implications du principe d'irréversibilité résultant du deuxième principe de la thermodynamique ?

Ce n'est là qu'une étude très partielle du travail ayant été accompli dans le domaine transdisciplinaire situé entre l'économie et la thermodynamique.

Peu de travaux, sauf peut-être pour celui de Månsson (1986), ont été consacrés aux liens existants entre les considérations ci-avant et la durabilité de la croissance (ou plutôt du développement), vus sous l'angle des indicateurs du développement durable. La seconde préoccupation mentionnée plus haut est toutefois liée à ce concept. La présente étude entend combler un vide entre la thermodynamique et l'économie dans ce champ particulier. Elle s'attache plus précisément à plusieurs objectifs :

- présentation d'une enquête et des caractéristiques essentielles de certains des travaux ayant été effectués dans notre domaine,
- compte-rendu de quelques directions de recherche possibles, où l'on peut considérer l'exergie comme un déterminant de certains indicateurs appropriés pour une croissance durable, avec des exemples et des applications à l'appui.

### **3.2 Thermodynamique et économie : les premières approches**

#### **3.2.1 Les lois de la thermodynamique**

Nous rappelons ici les principales implications du Chapitre 2. Le premier principe de la thermodynamique, ou celui de la conservation de l'énergie, stipule que dans un système isolé, l'énergie totale est conservée. Cela signifie qu'à l'intérieur du processus de production, c'est-à-dire pour un système donné, la somme des entrées et sorties d'énergie est nulle. Il ne s'agit là que d'un principe de conservation, tel qu'il en existe tant dans d'autres branches de la physique.

Mais la thermodynamique est la seule branche de la physique où le concept économique d'efficacité joue un rôle central, au travers de l'efficacité dite *de Carnot*. En particulier, dans la production thermique de travail physique ou d'électricité, le deuxième principe de la thermodynamique implique que l'efficacité de la chaleur (ou sa productivité, considérée du point de vue économique) se voit imposer une limite supérieure par l'efficacité de Carnot :

$$\frac{W}{|Q|} \leq \eta < 1$$

équ. 43

où Q représente la chaleur utilisée dans la centrale de production (Q < 0, la chaleur étant un facteur), et W représente le travail physique dans la centrale (W > 0, le travail physique étant un produit), tandis que η représente l'efficacité de Carnot.

Ceci découle du deuxième principe de la thermodynamique, lequel déclare « qu'il est impossible de produire un travail avec une machine à fonctionnement cyclique, n'ayant qu'une seule source de chaleur » (Kelvin (1852)).

Cette formulation du deuxième principe de la thermodynamique peut être déduite d'une formulation plus générale, affirmant que toute transformation possible où un système évolue d'un état A à un état B, avec variation d'entropie  $\Delta S = S_B - S_A$ , s'accompagne de la création d'une certaine entropie positive:

$$\Delta S = S_B - S_A = \int_A^B \left[ \frac{dq}{T} + d\widehat{S} \right],$$

équ. 44

la création d'entropie étant non négative ( $d\widehat{S} \geq 0$ ), avec  $d\widehat{S} = 0$  si et seulement si la transformation est réversible, et  $d\widehat{S} > 0$  si et seulement si la transformation est irréversible.

En particulier, pour une évolution cyclique (B = A):

$$\Delta S = \int \left[ \frac{dq}{T} + d\widehat{S} \right] = 0$$

équ. 45

De sorte que:

$$\int \frac{dq}{T} \leq 0$$

équ. 46

Dans le cas d'un système lié à un nombre fini de sources de chaleur :

$$\sum_{i=0}^n \frac{Q_i}{T_i} \leq 0$$

équ. 47

Il s'agit là de l'inégalité dite de Clausius, s'il existe n + 1 sources de chaleur 0...i...n, avec les températures  $T_0 < T_1 \dots T_i < T_{i+1} \dots T_{n-1} < T_n$ .

Bien évidemment, l'équation (43) implique que dans un système isolé, l'entropie s'accroît avec le temps (système irréversible) ou demeure constante (système réversible), qui est la formulation de Clausius du deuxième principe de la thermodynamique.

### 3.2.2 De l'inégalité de Clausius à un système de tarification

Comme l'ont montré plusieurs auteurs tels que Berry *et al.* (1978), ou encore Grubbström (1984), et de même que l'implique similairement le modèle « optimum de Pareto » de Lesourd et Gousty (1981), ces propriétés thermodynamiques de la chaleur supposent un système de « prix avec escompte de température » (Grubbström (1984)).

Pour établir cette propriété, considérons un moteur thermique cyclique associé aux  $n + 1$  sources de chaleur ci-avant, et utilisant comme ressources  $Q_0, Q_1 \dots Q_i, Q_{i+1} \dots Q_{n-1}, Q_n$  et la quantité de travail physique  $W$ , avec au moins une production strictement positive autre que  $Q_0$ . Soient  $\pi_0, \pi_1 \dots \pi_i, \pi_{i+1} \dots \pi_{n-1}, \pi_n$ , et  $\pi_w$  les prix (positifs) respectifs des diverses chaleurs et du travail physique. Nos variables  $Q_0, Q_1 \dots Q_i, Q_{i+1} \dots Q_{n-1}, Q_n$  et  $W$  sont les quantités d'énergie utilisée, ou produite, au cours d'un temps fini donné. Elles peuvent donc être aussi interprétées comme des quantités par unité de temps, ou des puissances physiques. Cette interprétation en termes de quantités par unité de temps prévaudra dès lors pour ces variables, ainsi que pour toutes les autres variables définies comme des quantités d'énergie, d'exergie et d'entropie (qui sont nommées *variables extensives* dans le langage de la thermodynamique).

Le profit  $\Pi$  de la société exploitant la machine est:

$$\Pi = \sum_{i=0}^n \pi_i Q_i + \pi_w W \quad \text{éq. 48}$$

Ce profit peut être maximisé par rapport à  $Q_0, Q_1 \dots Q_i, Q_{i+1} \dots Q_{n-1}, Q_n$  et  $W$ , avec les contraintes suivantes :

$$\sum_{i=0}^n \frac{Q_i}{T_i} - \hat{S} = 0 \quad \text{éq. 49}$$

et (premier principe de la thermodynamique) :

$$\sum_{i=0}^n Q_i + W = 0 \quad \text{éq. 50}$$

En éliminant  $Q_0$  via le recours à la dernière équation, il vient :

$$\sum_{i=1}^n Q_i \left( \frac{1}{T_i} - \frac{1}{T_0} \right) - \frac{W}{T_0} + \widehat{S} = 0 \quad \text{éq. 51}$$

En multipliant par  $T_0$ , nous obtenons une forme équivalente de la contrainte :

$$\sum_{i=1}^n Q_i \left( 1 - \frac{T_0}{T_i} \right) + W - T_0 \widehat{S} = 0 \quad \text{éq. 52}$$

Pour maximiser  $\Pi$  sous la contrainte (48), par rapport à  $Q_1, Q_2 \dots Q_i, Q_{i+1} \dots Q_{n-1}, Q_n$  et  $W$ , il faut faire des hypothèses spécifiques concernant la forme fonctionnelle de  $\widehat{S}$ . Comme proposé par Berry *et al.* (1978), en particulier, une hypothèse simple est de supposer que pour un cycle de temps fini (et donc irréversible),  $\widehat{S}$  est une forme quadratique positive semi-définie, issue de la thermodynamique des phénomènes irréversibles, de Prigogine :

$$\widehat{S} = \frac{1}{2} \sum_{i,j=0}^n \beta_{ij} Q_i Q_j \quad \text{éq. 53}$$

La contrainte étant concave, l'optimum est tel qu'on a pour une source quelconque de chaleur :

$$\frac{\pi_i}{\pi_w} = \left( 1 - \frac{T_0}{T_i} \right) - \sum_{j=0}^n \beta_{ij} Q_j \quad \text{éq. 54}$$

Finalement, chaque fois que  $Q_j \rightarrow 0$  pour tous les  $j$ , i.e. chaque fois qu'on est proche de la réversibilité, on a :

$$\frac{\pi_i}{\pi_w} = \left( 1 - \frac{T_0}{T_i} \right) = \eta_i \quad \text{éq. 55}$$

qui est l'efficacité de Carnot, associée à la source de chaleur  $i$ , avec référence à la source la plus froide 0.

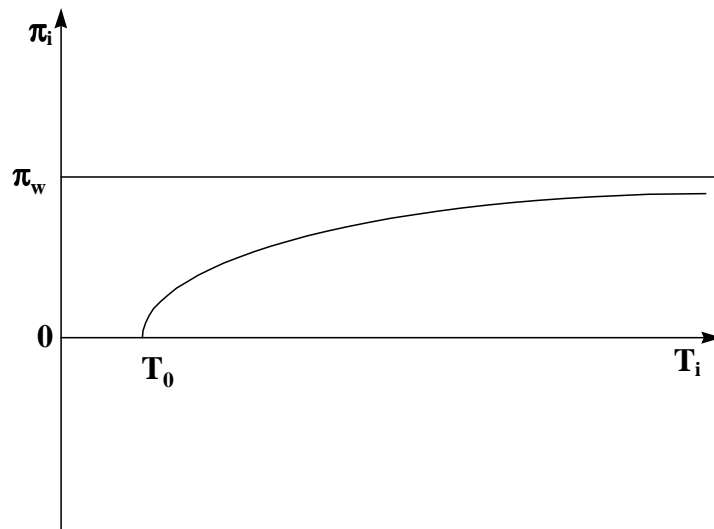


Figure 7 : prix avec escompte de température de Grubbström

Le prix avec escompte de température de Grubbström est étroitement lié à un important concept: l'exergie. Pour n'importe quelle forme d'énergie, dans le cas particulier où existe une source froide infinie disponible entourant le système, la teneur d'exergie est définie comme le produit du contenu en énergie par un facteur de qualité  $\eta_i = 1 - \frac{T_0}{T_1}$ .

### 3.2.3 L'exergie et le processus de production

La mesure de la qualité d'origine d'une ressource porte sur sa disponibilité à produire un travail physique. Du fait de la propriété entropique du processus de production, toute dissipation d'énergie ou de matière est une preuve physique de déperdition (gaspillage): la dissipation, tant d'énergie que de matière, accroît l'entropie. Inversement, toute création d'entropie ne peut être séparée d'une destruction d'exergie, la quantité maximale d'énergie pouvant être extraite d'une certaine quantité de combustible. Comme Månsson (1986) l'a mis en évidence, l'un des facteurs limitatifs du processus de production est la disponibilité de l'exergie.

Soit l'indicateur cardinal suivant, représentant la teneur en exergie d'une chaleur quelconque  $Q$  à la température  $T_1$  :

$$E = Q \left(1 - \frac{T_0}{T_1}\right)$$

équ. 56

où  $Q$  est la quantité de chaleur disponible à partir du combustible durant le processus de production (l'*enthalpie* du combustible)  $T_0$ , la température de la source froide  $T_1$ , la température de la source chaude à laquelle la chaleur est rendue disponible. La quantité d'exergie  $E$  est *détruite* dans le processus de production.

Quand le processus de production se déroule effectivement en un temps fini, le changement qualitatif peut être mesuré par l'augmentation de chaleur dissipée dans l'environnement, ou transférée vers la source froide. Ceci est étroitement lié à la destruction d'exergie.

Pour être à même de définir un taux de destruction de l'exergie comme un indicateur pour la durabilité du processus de production, il convient de prendre en compte les possibilités de substitution entre les entrées (inputs), le *produit* de sortie (output) et la *déperdition* de sortie.

Plus généralement, considérons la capacité à produire du travail physique (par unité de temps) dans un processus de production, selon l'équation (48). En supposant tout d'abord que les  $Q_i$  sont des inputs ( $Q_i < 0$ ), on obtient :

$$L = \Delta E = \sum_{i=0}^n |Q_i| \left(1 - \frac{T_0}{T_i}\right) - W = T_0 \hat{S}$$

équ. 57

$\Delta E$ , qui est la perte d'exergie ou la destruction d'exergie durant le processus, est clairement égal à l'exergie initiale présente dans les combustibles, moins le travail effectivement produit. Ce dernier est étroitement lié à la création d'entropie dans le processus, puisque :

$$L = \Delta E = T_0 \hat{S}$$

équ. 58

### **3.3 Durabilité, processus de production et irréversibilité : indicateur du développement durable basé sur l'exergie**

#### **3.3.1 Processus de production et irréversibilité**

Le deuxième principe de la thermodynamique, sous la formulation de Clausius (comme montré ci-avant), est appelé la loi de l'entropie. Les implications économiques de cette loi ont été analysées par Georgescu-Roegen (1971, 1976) et se prêtent à une exposition des conditions d'un processus de production durable.

Selon cette loi, le processus de production change une certaine quantité d'énergie et de matière en chaleur, c'est-à-dire transforme irréversiblement une entropie basse en entropie

élevée. Ceci comporte des implications qualitatives pour le processus de production, puisqu'il génère irrévocablement un output de type déchet comme produit connexe. La première conséquence du deuxième principe est la dégradation irréversible de l'énergie<sup>23</sup>.

Conformément au deuxième principe de la thermodynamique, la durabilité d'un processus de production dépend de la qualité de tous les éléments (y compris les inputs) passant au travers de ce processus, durant un certain laps de temps. Le processus de production, par sa transformation de ressources naturelles en produits et déchets, est adapté à un relevé ordinal. La variation qualitative du processus, mesurée par la variable d'entropie, peut être reliée à un résidu de basse qualité : le déchet.

La production de déchets peut être vue comme une implication de l'irréversibilité des processus de production. La dissipation survient chaque fois que des déchets sont produits.

Dans ce contexte, seule une partie des déchets peut être réutilisée sans création d'entropie, ou destruction d'exergie : il s'agit là, pour ainsi dire, de matière « dissipée », mise sous une forme n'étant plus utilisable d'un point de vue économique.

Il est possible de mesurer la durabilité d'un processus de production par la prise en compte de son degré d'irréversibilité, lequel est lié à sa capacité de produire des déchets en général, et de l'énergie dissipée en particulier. Ce point sera développé ultérieurement.

### **3.3.2 Propriété de substituabilité et durabilité**

La durabilité est habituellement associée aux caractéristiques des ressources naturelles utilisées dans le processus de production. Selon le degré de substitution entre les inputs, le développement peut présenter une durabilité faible ou forte (Pearce et Turner (1990)). La durabilité du développement est mise en danger s'il n'existe aucune possibilité de substitution (Stern (1997)).

Il résulte de l'analyse thermodynamique du processus de production que la propriété de substituabilité revêt une dimension double, puisqu'elle est liée tant à la nature des inputs qu'à leur arrangement au sein du processus de production.

La substitution est effectuée *ex ante*, avant la mise en œuvre du processus de production. Ainsi ne s'intéresse-t-elle qu'au produit marginal des inputs, sans s'occuper des déchets.

---

<sup>23</sup> Georgescu-Roegen a transposé cette loi de l'entropie à la matière. Dans ce contexte, il a formulé une loi dite « quatrième principe de la thermodynamique », selon laquelle dans un système fermé, la matière se dissipe irrémédiablement.

Cette première forme de substitution possède une dimension cardinale. Seules s'appliquent ici les lois de conservation de la physique, y compris le premier principe de la thermodynamique : à l'intérieur du processus de production en particulier, et conformément à la conservation de la masse, les entrées et sorties ont la même masse.

Dans le contexte du deuxième principe de la thermodynamique, la substitution nous permet de prendre en compte la qualité de l'input. Ainsi acquiert-elle une dimension ordinale, et mène à un certain arrangement des facteurs de production. Nous ne substituons pas ici une tonne de produits pétroliers à une tonne de charbon, mais une certaine qualité d'un combustible particulier à une certaine qualité d'un autre combustible.

L'implémentation d'un processus de production durable peut prendre l'une ou l'autre des directions suivantes :

- substitutions parmi différents inputs à potentiel énergétique élevé, spécialement quand des inputs à énergie renouvelable se substituent à des inputs non renouvelables;
- substitution indirecte via une efficacité améliorée dans la combinaison des inputs : ceci est lié à de possibles substitutions entre l'énergie et d'autres inputs non énergétiques, tels que capital et travail, menant à des efficacités plus élevées.

La prise en compte de la dimension « exergétique » d'un processus de production avec substitutions indirectes nous permet de définir une condition quant à la durabilité, puisqu'il ne doit être recouru qu'aux seules substitutions réduisant la création d'entropie, ou la destruction d'exergie.

### **3.3.3 Technologies durables : irréversibilité et destruction d'exergie**

La définition par Georgescu-Roegen d'une technologie réalisable, dans son analyse d'un processus de production au travers d'une approche à « fonds circulant ou flux », souligne le rôle de la technologie dans l'intervalle de la durée du processus. La technologie définit l'accessibilité de tout input présent dans le processus de production. L'efficacité de Carnot définit la limite supérieure pour l'efficacité de la transformation. En outre, les flux d'énergie sont toujours nécessaires, les inputs énergétiques étant essentiels. Toutefois, bien que les technologies actuelles, qui économisent des énergies non renouvelables, soient des technologies réalisables, elles ne constituent pas des technologies durables, dans la mesure où elles reposent sur des combustibles fossiles. Ainsi, tout indicateur de conservation d'énergie fossile doit prendre deux aspects en considération : les économies d'énergies effectives concernant les combustibles fossiles (ce qui est lié à l'efficacité exergétique des processus), et la substitution des combustibles fossiles par des énergies renouvelables.

Pour tout apport d'énergie, et spécialement dans le cas des combustibles fossiles, une mesure des deux facteurs suivants doit être considérée :

- la qualité d'origine, à un instant donné t, de la quantité d'énergie disponible (indicateur cardinal);
- le changement de la qualité d'origine de la quantité d'énergie disponible, pour une durée temporelle donnée (indicateur ordinal).

La mesure de la qualité d'origine d'une ressource porte sur sa capacité à produire un travail physique. Il est clair qu'une destruction d'exergie est équivalente à une production d'entropie. Inversement, toute création d'entropie est équivalente à une destruction d'exergie, l'exergie étant la plus grande quantité possible d'énergie de qualité supérieure (travail mécanique, électricité) pouvant être extraite d'une quantité donnée de combustible. Comme l'a fait remarquer Månsson (1986), un facteur limitatif pour tout processus de production est la disponibilité de l'exergie, et non la disponibilité de l'énergie, quelle que soit sa qualité.

Pour n'importe quelle forme d'énergie, comme montré plus haut, la teneur en exergie est définie comme le produit de la teneur en énergie par un facteur de qualité f, avec  $0 \leq f \leq 1$ .

Nous sommes donc amenés à définir un taux très général de destruction d'exergie  $\lambda$ , avec  $\lambda \in [0,1]$ :

$$\lambda = \frac{\sum_m J_m + \sum_n W_n}{\sum_j I_j + \sum_k E_k} \quad \text{éq. 59}$$

avec les définitions suivantes :  $J_m$  est l'exergie disponible par unité de temps, dans les déchets produits de type m;  $W_n$  est l'exergie disponible par unité de temps dans l'output d'énergie n;  $I_j$  est l'input d'exergie par unité de temps dans le facteur matériel non combustible j;  $E_k$  est l'input d'exergie par unité de temps dans le combustible, ou le facteur d'énergie k. Spécialement dans le cas d'inputs non renouvelables tels que les combustibles fossiles, plus  $\lambda$  est élevé, plus le processus de production est durable, en ce sens qu'il économise davantage de ressources non renouvelables et produit des déchets moins

recyclables, leur recyclabilité étant mesurée par leur exergie. Quand le rendement d'exergie augmente, le taux de destruction d'exergie décroît, c'est-à-dire que la production de déchets est réduite. Pour un flux d'énergie donné et pour des quantités d'input inchangées, la quantité d'exergie détruite ne dépend que de l'arrangement des inputs. La durabilité découle de la dimension qualitative du processus de production, et plus précisément de son efficacité exergétique.

Dans le cas particulier de la production d'énergie, où seuls sont obtenus des inputs d'énergie et des outputs d'énergie, nous avons :

$$\lambda = \frac{\sum_n W_n}{\sum_k E_k} \quad \text{éq. 60}$$

Ici,  $\lambda$  est équivalent à l'efficacité  $\psi$  (dite du second principe) du processus, définie comme :

$$\psi = \frac{\sum_n Q_n \left(1 - \frac{T_n}{T_0}\right) + \sum_{n'} W_{n'}}{\sum_k Q_k \left(1 - \frac{T_k}{T_0}\right) + \sum_{k'} W_{k'}} \quad \text{éq. 61}$$

Bien que l'équation (56) soit physiquement valable indépendamment du caractère renouvelable des inputs d'énergie, il s'agit d'un indicateur pertinent de la durabilité du processus seulement si les sources d'énergie sont non-renouvelables. Elle indique dans ce cas le moyen plus ou moins efficace par lequel sont utilisés ces inputs d'énergie non renouvelable.

Dans le cas d'un nombre N de processus utilisateurs d'énergie, indépendants et additifs, 1 ... u ... N, telle qu'une entité macroéconomique par exemple, soit  $\lambda_u$  la valeur pertinente de  $\lambda$ , telle que définie par (56) pour le processus u. Nous pouvons de ce fait calculer un indice  $\Lambda$ , pondéré de l'input d'exergie, comme :

$$\Lambda = \frac{\sum_u \lambda_u E_u}{\sum_u E_u} \quad \text{éq. 62}$$

Dans cette équation,  $E_u$  représente l'input d'exergie pour le processus  $u$ , par unité de temps. Toutefois, cet indice n'a de sens que pour les énergies non renouvelables. S'il est recouru à des énergies renouvelables, il faut alors prendre en compte le fait que dans ce cas, la perte d'exergie peut être récupérée à partir de la source d'énergie renouvelable, comme si le processus était réversible. Nous sommes ainsi conduits à l'indice général suivant :

$$\Phi = \frac{\sum_u \phi_u E_u}{\sum_u E_u} = \sum_u \phi_u \omega_u \quad \text{éq. 63}$$

avec  $\phi_u = \lambda_u$  pour une source d'énergie non renouvelable, et  $\phi_u = 1$  pour une source d'énergie renouvelable, ou pour le cas limitatif d'un processus réversible.

Finalement, l'indicateur de développement durable que nous proposons ici vise à mettre en évidence l'importance des économies d'énergie non renouvelable, dans la production d'énergies secondaires telles que l'électricité. Comme mentionné plus haut, celles-ci sont reliées premièrement à l'efficacité exergétique des processus employant des combustibles fossiles, et deuxièmement, à la substitution de ces combustibles fossiles par des inputs d'énergie renouvelable.

### 3.4 Application

#### 3.4.1 L'étude de cas

Notre application empirique traite d'un service énergétique spécifique, à savoir : la production de chaleur pour le chauffage de zones résidentielles. Notre but est premièrement d'évaluer les économies potentielles d'énergie primaire découlant d'une substitution du système de chauffage traditionnel (basé sur la combustion de combustibles fossiles dans une chaudière), par des systèmes de chauffage moins conventionnels, tels que radiateur électrique, pompe à chaleur électrique ou système combiné chaleur-puissance (CHP), assorti à une pompe à chaleur. Deuxièmement, nous calculons et comparons la valeur de l'indicateur de développement durable (59) pour tous ces systèmes de chauffage.

#### 3.4.2 Calcul de l'efficacité exergétique des systèmes de chauffage

Pour évaluer l'énergie transférée à l'atmosphère d'une chambre chauffée, nous estimons les pertes d'énergie d'une chaudière (conformément au premier principe de la thermodynamique) à un taux de 20 %, incluant les pertes de chaleur sur le réseau de distribution d'eau chaude. La consommation primaire d'énergie d'un système de chauffage

est en conséquence la somme de l'énergie thermique requise pour le chauffage, et des pertes d'énergie selon le premier principe de la thermodynamique.

Dans la figure ci-dessous, nous présentons le système de chauffage de référence, à savoir une chaudière alimentée au mazout<sup>24</sup>.

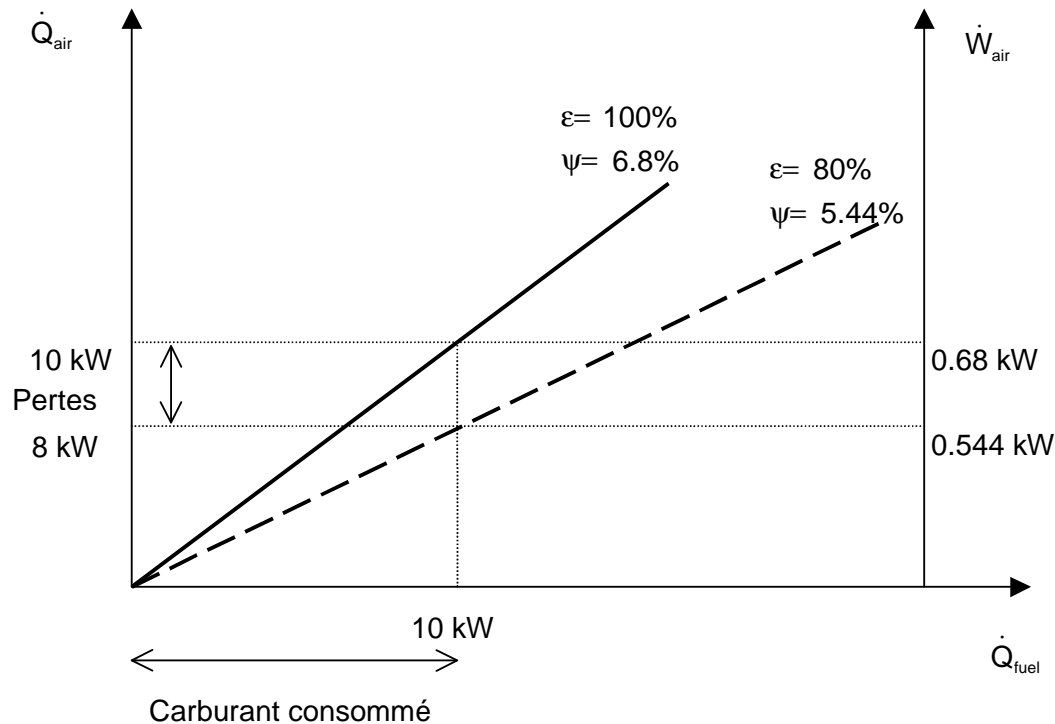


Figure 8 : cas de référence : chaudière alimentée au mazout

Avec une chaudière de puissance énergétique de chauffage  $\dot{Q}_{\text{fuel}} = 10 \text{ kW}$ , la puissance énergétique transférée à l'air chauffé est  $\dot{Q}_{\text{air}} = 8 \text{ kW}$ , si l'efficacité énergétique du système de chauffage est  $\varepsilon = 80 \%$ <sup>25</sup>. En se référant à une température pour la chambre chauffée de  $T_{\text{air}} = 20^\circ \text{C} = 293,16\text{K}$ , ainsi qu'à une température extérieure de  $T_o = 0^\circ \text{C} = 273,16\text{K}$ , la puissance exergétique de l'air chauffé est donc égale à :

<sup>24</sup> Pour éviter les confusions, nous n'utilisons dans ce qui suit que les taux instantanés de consommation d'énergie, appelés puissances. Ces taux seront indiqués selon la notation classique, par le symbole « point » de la dérivée par rapport au temps.

<sup>25</sup> Nous supposons que la chaleur produite par la chaudière est distribuée via un réseau d'eau chaude, avec des températures de travail de  $80^\circ \text{C} / 60^\circ \text{C}$ , doté de radiateurs.

$$\dot{W}_{\text{air}} = \dot{Q}_{\text{fuel}} \left( 1 - \frac{T_0}{T_{\text{air}}} \right) \varepsilon = 10 \cdot \left( 1 - \frac{273,16}{193,16} \right) \cdot 0,8 = 0,544 \text{ kW} \quad \text{éq. 64}$$

Cette manière de calculer  $\dot{W}_{\text{air}}$  s'applique quel que soit le système de chauffage utilisé. Par exemple, s'il ne survient aucune perte d'énergie, c'est-à-dire pour  $\varepsilon = 100 \%$ , la puissance exergétique de l'air chauffé est :

$$\dot{W}_{\text{air}} = \dot{Q}_{\text{fuel}} \left( 1 - \frac{T_0}{T_{\text{air}}} \right) \varepsilon = 10 \cdot \left( 1 - \frac{273,16}{193,16} \right) \cdot 1 = 0,68 \text{ kW} \quad \text{éq. 65}$$

Au contraire, la teneur en puissance exergétique du combustible dépend du système de production de chaleur.

Quand il est recouru à une chaudière, la puissance exergétique du combustible brûlé est, par définition :

$$\dot{E}_{\text{fuel}} = \dot{Q}_{\text{fuel}} = 10 \text{ kW} \quad \text{éq. 66}$$

Par conséquent, l'efficacité exergétique (57) de ce système de chauffage est :

$$\psi = \left( 1 - \frac{T_0}{T_{\text{air}}} \right) \varepsilon = 5,44\% \quad \text{éq. 67}$$

Pour un radiateur électrique, la teneur en puissance exergétique du combustible dépend du type de centrale produisant l'électricité utilisée. Nous la calculons donc suivant :

$$\dot{E}_{\text{fuel}} = \dot{Q}_{\text{fuel}} \lambda_{\text{power station}} = 10 \text{ kW} \lambda_{\text{power station}} \quad \text{éq. 68}$$

où  $\lambda_{\text{power station}}$  désigne l'efficacité exergétique de la centrale, mise à 50 % pour une centrale thermique, à 32 % pour une centrale nucléaire et à 93 % pour une centrale hydraulique<sup>26</sup>. Par conséquent, pour un radiateur électrique, la formule (57) aboutit à une efficacité exergétique de :

---

<sup>26</sup> Voir (Reistad (1975)).

$$\Psi = \frac{\left(1 - \frac{T_0}{T_{\text{air}}}\right) \varepsilon}{\lambda_{\text{power station}}} \quad \text{éq. 69}$$

Les chiffres d'efficacité pour les trois centrales susmentionnées sont présentés ci-après, dans le tableau 1 (systèmes de chauffage 2, 3 et 4).

Pour calculer l'efficacité exergetique d'une pompe à chaleur, nous prenons également en compte la puissance exergetique du compresseur. La puissance exergetique fournie par le condenseur à la chambre chauffée doit être identique à celle transférée par les systèmes de chauffage précédents. La différence entre la puissance exergetique du compresseur et celle du condenseur est la puissance exergetique de l'évaporateur: un dispositif transférant l'énergie de l'air vers le compresseur.

En supposant un coefficient pratique de rendement pour la pompe à chaleur, égal à 50 % de sa valeur théorique, à savoir :

$$\text{COP}_{\text{theoretical}} = \frac{T_{\text{condenser}}}{T_{\text{condenser}} - T_{\text{evaporator}}} = 4,26 \quad \text{éq. 70}$$

et des températures de fonctionnement moyennes, pour le condenseur et l'évaporateur, de  $T_{\text{condenser}} = 80^\circ\text{C}$  et  $T_{\text{evaporator}} = -3^\circ\text{C}$ <sup>27</sup>, la teneur en puissance exergetique du combustible est :

$$\dot{E}_{\text{fuel}} = \frac{\dot{Q}_{\text{condenser}}}{0,5 \text{ COP}_{\text{theoretical}}} \lambda_{\text{power station}} = \frac{10 \text{ kW}}{0,5 \cdot 4,26} \lambda_{\text{power station}} = 4,7 \text{ kW} \lambda_{\text{power station}} \quad \text{éq. 71}$$

Finalement, l'efficacité exergetique de la pompe à chaleur s'avère être la suivante :

$$\Psi = \frac{\dot{Q}_{\text{fuel}} \left(1 - \frac{T_0}{T_{\text{air}}}\right) \varepsilon}{0,5 \text{ COP}_{\text{theoretical}} \lambda_{\text{power station}}} \quad \text{éq. 72}$$

Pour autant que cela concerne un système CHP assorti à une pompe à chaleur, la

---

<sup>27</sup> Ce sont là des températures de marche normales, pour une pompe à chaleur connectée à un réseau hydraulique de distribution de chaleur.

puissance exergetique du combustible est la somme des puissances exergetiques du condenseur et du recuperateur, à savoir :

$$\dot{E}_{\text{fuel}} = \dot{E}_{\text{condenser}} + \dot{E}_{\text{recuperator}} = \frac{\dot{Q}_{\text{fuel}}}{0,5 \text{ COP}_{\text{theoretical}} \cdot \varepsilon_{\text{electric}} + \varepsilon_{\text{thermal}}} = 8,3 \text{ kW} \quad \text{éq. 73}$$

où  $\varepsilon_{\text{electric}} = 27 \%$  et  $\varepsilon_{\text{thermal}} = 63 \%$ , désignant respectivement les efficacités énergétiques de la production d'électricité CHP et de la récupération de chaleur. Il en résulte que l'efficacité exergetique de ce système de chauffage est :

$$\psi = \left( 1 - \frac{T_0}{T_{\text{air}}} \right) \varepsilon (0,5 \text{ COP}_{\text{theoretical}} \varepsilon_{\text{electric}} + \varepsilon_{\text{thermal}}) \quad \text{éq. 74}$$

### 3.4.3 Résultats et discussion

En combinant les quatre systèmes de chauffage précédemment analysés avec quatre différentes technologies de production d'électricité, à savoir :

- la thermoélectricité,
- l'hydroélectricité,
- l'électricité nucléaire,
- l'électricité « swiss-mix » (2.34 % de thermoélectricité, 40.05 % d'électricité nucléaire et 57.61 % d'hydroélectricité),

nous définissons dix systèmes de chauffage, dont les comportements sont comparés dans le tableau 1. Ces systèmes de chauffage sont :

1. une chaudière alimentée au mazout ou au gaz naturel,
2. un radiateur électrique alimenté à la thermoélectricité,
3. un radiateur électrique alimenté à l'hydroélectricité,
4. un radiateur électrique alimenté à l'électricité nucléaire,
5. un radiateur électrique alimenté à l'électricité « swiss-mix »,
6. une pompe à chaleur alimentée à la thermoélectricité,
7. une pompe à chaleur alimentée à l'hydroélectricité,

8. une pompe à chaleur alimentée à l'électricité nucléaire,
9. une pompe à chaleur alimentée à l'électricité « swiss-mix »,
10. un système CHP alimenté au gaz naturel ou au mazout, assorti à une pompe à chaleur.

Tableau 1 : comportement des systèmes de chauffage

Case	$\psi$ %	Q TJ/year	Net energy saving		$\Phi$ %
			%	TJ/year	
1	5.44	235.90	-	-	5.44
2	2.72	471.80	- 100.0	- 235.90	2.72
3	5.04	254.62	- 7.9	- 18.72	100.00
4	1.76	729.15	- 209.1	- 493.25	1.76
5	3.67	349.46	- 48.1	- 113.56	58.38
6	5.68	225.93	4.2	9.97	5.68
7	10.24	125.32	46.9	110.58	100.00
8	3.60	356.47	- 51.1	- 120.57	3.60
9	7.47	171.70	27.2	64.20	59.19
10	6.56	195.62	17.1	40.28	6.56

La première colonne du tableau 1 compare l'efficacité exergétique de dix systèmes de chauffage. La meilleure efficacité est atteinte par une pompe à chaleur alimentée à l'hydroélectricité ( $\psi = 10.24$  %), la plus mauvaise étant celle d'une pompe à chaleur alimentée à l'électricité nucléaire ( $\psi = 1.76$  %).

En prenant la consommation annuelle actuelle de combustible par les immeubles résidentiels loués par la Ville de Genève, à savoir 235,9 TJ/an<sup>28</sup>, nous avons estimé la consommation de combustible nécessaire pour assurer le même service de chauffage si nous passons du système de chauffage actuel (à savoir une chaudière alimentée au mazout ou au gaz naturel), à l'un des neuf autres systèmes de chauffage que nous considérons. Ces chiffres, de même que les économies d'énergie nettes découlant des changements de ce système de chauffage, sont présentés dans les colonnes deux à quatre du tableau 1. Nous pouvons voir que le système de chauffage le plus efficace exergétiquement, à savoir la pompe à chaleur alimentée à l'hydroélectricité, permet une économie de combustible de 46.9 %, correspondant à une conservation d'énergie de 110.58 TJ/an. Le deuxième meilleur

<sup>28</sup> Ces chiffres ont été fournis par les Services de l'Energie de la Ville de Genève.

système de chauffage : une pompe à chaleur alimentée à l'électricité « swiss-mix », permet encore une économie d'énergie de 27.2 %, correspondant à 64.20 TJ/an.

La dernière colonne du tableau 1 présente la valeur de l'indicateur de développement durable (59), calculé pour chacun des dix systèmes de chauffage. Comme illustration, nous montrons comment calculer cet indicateur pour une pompe à chaleur alimentée à l'électricité « swiss-mix », à savoir :

$$\Phi = 1 \cdot \omega_{\text{hydro}} + \lambda_{\text{thermal}} \cdot \omega_{\text{thermo}} + \lambda_{\text{nuclear}} \cdot \omega_{\text{nuclear}} \quad \text{éq. 75}$$

où  $\lambda_{\text{thermal}}$  et  $\lambda_{\text{nuclear}}$  représentent respectivement l'efficacité exergétique de la thermoélectricité et de l'électricité nucléaire, et  $\omega_{\text{hydro}}$ ,  $\omega_{\text{thermo}}$ ,  $\omega_{\text{nuclear}}$  désignent les parts de l'hydroélectricité, de la thermoélectricité et de l'électricité nucléaire dans l'électricité « swiss-mix ».

Il est clair que cet indicateur n'atteint sa valeur maximale de 100 % que pour un système de chauffage exclusivement alimenté par une énergie renouvelable, comme c'est le cas pour le radiateur électrique ou la pompe à chaleur alimentée à l'hydroélectricité. Lorsqu'on utilise seulement du combustible non renouvelable, l'indicateur de développement durable est identique à l'efficacité exergétique présentée dans la première colonne du tableau 1. En conséquence, cet indicateur ne fournit une information nouvelle que pour les deux systèmes de chauffage alimentés à l'électricité « swiss-mix », produite partiellement avec de l'énergie renouvelable, et partiellement avec de l'énergie non renouvelable. Dans ces cas, nous observons des chiffres très proches, dus à la part élevée de l'hydroélectricité dans le « swiss-mix » ainsi qu'à la très basse efficacité exergétique des systèmes de chauffage alimentés à l'électricité nucléaire, encore substantielle dans le « swiss-mix ».

### **3.5 Remarque finale du Chapitre 3**

Dans le présent document, nous discutons d'un indicateur du développement durable, basé sur l'exergie. Cet indicateur prend en compte deux moyens par lesquels peuvent être accomplies des économies d'énergie. Premièrement, il prend en considération l'efficacité exergétique moyenne (ou efficacité du deuxième principe) concernant les combustibles fossiles. Deuxièmement, il considère l'importance des sources d'énergie renouvelable utilisées comme substituts pour les combustibles fossiles. Cet indicateur peut être exprimé comme 1 moins le taux de destruction d'exergie obtenu à partir de sources d'énergie non renouvelable, comme montré par l'équation (59). Au niveau microéconomique, il est égal à l'efficacité (selon le deuxième principe) du processus pour une source d'énergie primaire non

renouvelable, dans le cas contraire à 1. Il est égal à 1, soit pour une source d'énergie renouvelable, soit pour un processus réversible (limitatif), et égal à zéro pour l'énergie provenant d'une source d'énergie non renouvelable étant entièrement dissipée, ou transférée à la source froide. Pour une entité microéconomique telle qu'une coupe transversale, ou pour une quantité macroéconomique, il est égal à la moyenne, pondérée selon la puissance, des indicateurs micro-économiques ci-avant.

Une application empirique simple nous montre comment implémenter en pratique le calcul d'un tel indicateur dans le cas des installations de chauffage existant dans la Ville de Genève, selon plusieurs hypothèses relatives aux technologies de chauffage utilisées. Avec l'actuelle combinaison dans la production de l'électricité suisse, l'indice de développement durable pour le chauffage d'espace est d'environ 60%, chiffre relativement élevé dû à l'importance des centrales hydroélectriques, considérées comme des sources d'énergie primaire renouvelable, dans le cas de la Suisse.

La manière dont nous avons traité les sources d'énergie renouvelable pose toutefois quelques problèmes. Premièrement dans un processus de développement durable, plusieurs critères doivent être pris en compte. Il est injuste de mettre un poids aussi important à la notion de renouvelable, car il ne suffit pas d'être renouvelable pour être conforme au développement durable. Il faut prendre en compte les notions de pollution, et autres critères spécifiant le domaine écologique, mais aussi les notions liées spécifiquement aux deux autres sphères du développement durable qui sont l'économie et le social. Le chapitre qui suit tentera de démontrer la possibilité d'obtenir un classement de source de production d'énergie électrique basée sur un développement durable, c'est-à-dire à la croisée de ces trois domaines. Deuxièmement, l'élargissement du calcul sur toute la chaîne énergétique a mis en évidence l'importance de la technologie utilisée pour transformer l'énergie primaire en énergie finale. Cette constatation nous a poussés à continuer notre étude sur le mode de production de l'électricité, ce que nous ferons au Chapitre 5.



## 4 Comparaison de différentes méthodes de classement d'indicateurs de développement durable<sup>29</sup>

### 4.1 Introduction

Le concept de développement durable faisant office de référence dans la communauté internationale est celui du Rapport Brundtland (WCED (1987)) qui définit le développement durable comme un développement permettant « la satisfaction des besoins des générations présentes sans compromettre la capacité des générations futures à répondre à leurs propres besoins, tout en préservant la diversité des espèces végétales et animales ». Dans cette optique une définition opérationnelle du développement durable d'un pays doit prendre en compte trois dimensions :

- la dimension économique, dans le but d'assurer le maintien ou la croissance du revenu réel par tête dans le long terme ;
- la dimension environnementale, dans le but d'assurer la pérennité du potentiel du « capital naturel » à régénérer les ressources énergétiques, matérielles et immatérielles renouvelables et à assimiler les flux de déchets générés par l'activité humaine ;
- la dimension sociale, dans le but d'assurer une répartition intra- et intergénérationnelle équitable du bien-être.

L'objet d'un ensemble d'indicateurs de développement durable est de permettre l'évaluation de l'état et de l'évolution d'un pays selon ces trois dimensions, tout en facilitant les comparaisons dans l'espace et le temps.

Pour appréhender le développement durable dans toute la complexité de ces trois dimensions, les indicateurs seront eux-mêmes multiples, complexes et, en général, non commensurables. Par exemple, pour le seul secteur de l'énergie Walter *et al.* (2001) proposent 60 indicateurs qui incluent, entre autres, non seulement des consommations

---

<sup>29</sup> Publié à l'origine par Environmental research, engineering and management avec le titre : Carlevaro, F., Garbely, M. et Genoud, S., (2003), Comparing and Assessing Control and Decision Methods for Sustainable Development, Environmental research, engineering and management, 2003.No.4(26), P.62-67.

d'énergie, des émissions de polluants et des prix, mais également des surfaces énergétiques de références, des taux d'auto-provisionnement et des indicateurs de l'activité de recherche.

Un ensemble d'indicateurs de développement durable doit par ailleurs répondre à des usages multiples, notamment :

- à un besoin de communication, pour informer de manière simple et non ambiguë les autorités et le public sur l'état ou l'évolution d'un pays ou d'une région ;
- à un besoin de description et d'explication, pour comprendre les déterminants qui sont à l'œuvre dans une chaîne complexe de causalités ;
- comme support à la décision, en fournissant les directions à suivre ou les tendances à corriger.

S'agissant de l'aide à la décision politique, ces outils doivent servir de clignotants de monitoring, permettant de fixer des objectifs à atteindre et de contrôler la conformité de l'évolution du pays à ces objectifs de durabilité et, le cas échéant, de suggérer le moment et la nature des actions à entreprendre pour rapprocher la situation observée des objectifs souhaités, voire même, d'indiquer les objectifs inappropriés à réviser. Ainsi, dans une optique de politique de développement durable, le monitoring joue un rôle central.

La mise en œuvre pratique d'un monitoring basé sur un système d'indicateurs doit pouvoir s'appuyer sur des méthodes de synthèse permettant de dégager une vision compréhensive de l'état et de l'évolution du pays en matière de développement durable.

Pour synthétiser l'information contenue dans un grand ensemble d'indicateurs, on peut recourir à un ou plusieurs indices composites en s'inspirant des méthodes développées par la statistique économique. Dans le cadre du développement durable toutefois, l'application concrète de cette démarche soulève plusieurs problèmes. En effet, les indicateurs choisis doivent être convertis pour obtenir le dénominateur commun, nécessaire à la réalisation d'une agrégation de type somme pondérée. De plus, il faut introduire des coefficients de pondération permettant de relativiser le poids de l'un ou l'autre des critères. Finalement, le type de compensation influence grandement le résultat obtenu. Ceci a justement été relevé par le rapport de l'OCDE/JRC (2005) qui présente un manuel pour construire des indicateurs composites, dans le cadre du développement durable. Ces auteurs présentent trois familles d'agrégation permettant de construire un indicateur composite et les ordonnent en fonction

de la compensation entre les critères, les méthodes d'agrégation additive, les méthodes d'agrégation géométrique et les méthodes d'agrégation multicritère.

Parmi les méthodes qui permettent de s'affranchir de la triple contrainte du dénominateur commun, de la connaissance de coefficients de pondération et de la compensation entre les critères, nous en avons retenu deux qui sont représentatives des méthodes de contrôle et de décision en matière de gestion environnementale, potentiellement extrapolables à la problématique plus vaste du développement durable.

La première est une méthode classique de benchmarking<sup>30</sup>, à savoir l'analyse par enveloppement des données ou méthode DEA. Initialement développée pour comparer des activités productives, elle a également donné lieu à de nombreuses applications relatives à des activités non marchandes. Ses développements récents ont montré qu'elle permet d'inclure également des composantes environnementales, et plus récemment encore des composantes sociales et politiques.

La deuxième appartient à la famille des méthodes multicritères d'aide à la décision qui ont pour but de traiter des problèmes à objectifs multiples tout en considérant des critères très divers et souvent antagonistes. Ces méthodes se sont développées pour aider le décideur à choisir parmi un ensemble d'actions potentielles. Elles permettent également le classement d'un ensemble d'actions ou de scénarios. Ces méthodes ont été qualifiées, par l'OCDE/JRC (2005), de « solutions de compromis qui n'apportent pas une optimisation de chaque critère ». L'approche du développement durable, qui ne peut être qu'une solution de compromis, comporte plusieurs critères pour prendre en compte ses trois dimensions, soit l'économie, l'écologie et le social. Ces critères sont difficilement abrégables. Il paraît donc très intéressant d'utiliser des méthodes multicritères pour obtenir un classement unique, représentant un compromis.

## ***4.2 Deux méthodes de monitoring du développement durable***

### **4.2.1 Le benchmarking**

Le benchmarking est une comparaison de la performance entre institutions ou entités ayant les mêmes domaines d'activité dans le but de définir une meilleure pratique et de situer l'ensemble des institutions par rapport à cette meilleure pratique. S'agissant d'activités

---

<sup>30</sup> Méthode considérée par l'OCDE/JRC (2005) comme une agrégation géométrique.

productives, la performance peut être assimilée à l'efficacité de la production c'est-à-dire à l'utilisation optimale d'un ensemble d'inputs pour obtenir un ensemble d'outputs.

Ce concept renvoie d'abord aux conditions techniques dans lesquelles est réalisée la production. Une production pourra être qualifiée de techniquement efficace si elle est réalisée sans gaspillage de ressources. En présence d'un seul input et d'un seul output, cela revient à utiliser la plus faible quantité d'input pour produire une quantité donnée de l'output ou, réciproquement, à produire la plus grande quantité possible d'output réalisable avec une quantité donnée d'input. En présence d'inputs et d'outputs multiples, ces notions d'efficacité productive sont généralisées en envisageant des variations le long d'échelles des vecteurs d'inputs et d'outputs. Si des prix existent pour tous les inputs et outputs, des notions économiques d'efficacité peuvent aussi être envisagées, notamment basées sur la minimisation du coût de production d'une quantité donnée d'outputs, sur la maximisation de la recette de la vente de la production réalisée avec une quantité donnée d'inputs ou, encore sur la maximisation du profit résultant de l'activité de production. Transposées au développement durable, ces notions économiques d'efficacité font apparaître les mêmes difficultés d'application qu'une analyse coûts-bénéfices. C'est pourquoi seule l'efficacité productive sera envisagée par la suite.

Plusieurs approches sont possibles pour mesurer l'efficacité, mais dans tous les cas, il faut pouvoir établir une frontière d'efficacité. C'est la distance à cette frontière qui permettra de calculer l'efficacité d'un processus. Il existe plusieurs méthodes d'estimation de la frontière efficace, les méthodes paramétriques, par exemple la méthode des moindres carrés ordinaires, et les méthodes non-paramétriques.

Nous allons présenter ici une méthode non paramétrique, méthode classique de benchmarking initialement développée pour comparer des activités productives et dont les développements récents ont montré qu'elle permet d'inclure des composantes environnementales. Cette méthode s'intitule l'analyse par enveloppement des données ou méthode DEA, du terme anglais « Data Envelopment Analysis ». Développée par Charnes *et al.* (1978), la DEA est une approche pour mesurer l'efficacité qui ne requiert aucune connaissance approfondie du processus de production des unités de décision à évaluer. Au cours des vingt dernières années, la DEA a inspiré de nombreux travaux de recherche dans des domaines aussi variés que les services financiers, les soins de la santé, les transports, l'éducation et les services publics les plus divers. Des travaux plus récents ont également incorporé des composantes environnementales dans cette approche par l'introduction d'outputs indésirables.

Les unités de décision peuvent être des entreprises, des filières de production, mais également des administrations, des services publics ou des institutions à but non lucratif. Toutefois, les unités considérées dans une analyse doivent être relativement homogènes, c'est-à-dire utiliser des inputs et des outputs comparables.

L'efficacité mesurée par la DEA est une efficacité relative, qui compare les unités observées à la meilleure pratique du secteur. Pour une activité de production, cette meilleure pratique est définie comme la frontière des possibilités de production dans l'espace des outputs (produits) et des inputs (facteurs de production). La frontière caractérise le niveau maximum de production accessible pour une utilisation donnée des inputs ou, de manière équivalente, la quantité minimale d'inputs nécessaire pour produire un niveau d'output donné. Aussi, une production est efficace si l'output réalisé et les inputs utilisés constituent un point sur la frontière de production. En deçà de la frontière, la production est inefficace. Une production inefficace gaspille des inputs. La frontière de production joue ainsi un rôle de critère ou de norme sur laquelle est jugée l'efficacité.

Ce rôle de norme distingue le concept d'efficacité de celui, plus traditionnel, de productivité. Alors que la productivité est définie comme un rapport entre outputs et inputs, l'efficacité elle, fait référence à une distance entre les quantités d'outputs et d'inputs observés et celles qui définissent la frontière. Le concept d'efficacité est construit sur la base d'une norme, alors qu'une telle norme est absente du concept de productivité<sup>31</sup>.

Le modèle classique de la DEA construit la frontière de production à l'aide de combinaisons linéaires des observations dans l'espace des inputs et outputs. Ces combinaisons linéaires définissent une frontière de production linéaire par morceaux qui « enveloppe » les observations par le haut de sorte qu'aucune observation ne se situe au-dessus de la frontière (cf. figure 8). Les pondérations servant à calculer les combinaisons linéaires sont obtenues par la solution de problèmes de programmation linéaire faisant intervenir les quantités d'inputs et d'outputs utilisées par les unités de l'échantillon servant à construire la frontière. La frontière de production ainsi déterminée représente donc la meilleure pratique au sein de ce groupe d'unités.

L'approche DEA classique propose trois mesures d'efficacité productive.

---

<sup>31</sup> Pour une présentation détaillée de la relation entre les concepts d'efficacité et de productivité ainsi que de la manière dont ils permettent d'incorporer et d'identifier le progrès technique, voir Thiry et Tulkens (1989).

### L'efficacité productive qui économise les inputs

Pour une unité produisant un vecteur d'outputs en quantités  $\mathbf{y}_0$  en utilisant un vecteur d'inputs en quantités  $\mathbf{x}_0$ , on cherche la réduction proportionnelle maximale des quantités d'inputs, soit le vecteur  $\varepsilon\mathbf{x}_0$ , où  $0 \leq \varepsilon \leq 1$  désigne le facteur de réduction, permettant à une unité efficace de réaliser la même production. Une unité efficace est définie par une combinaison linéaire des vecteurs d'inputs et d'outputs d'un échantillon d'unités observées, soit par  $\mathbf{x}_{\text{eff}} = X\lambda$  et  $\mathbf{y}_{\text{eff}} = Y\lambda$  où  $X$  et  $Y$  désignent les matrices des vecteurs d'inputs et d'outputs des unités de l'échantillon. Le facteur de réduction  $\varepsilon$  est déterminé par le programme d'optimisation suivant :

$$\begin{array}{l} \text{minimiser } \varepsilon \\ \text{sous / contraintes : } \varepsilon\mathbf{x}_0 \geq X\lambda, \mathbf{y}_0 \geq Y\lambda \end{array} \quad \text{équ. 76}$$

La minimisation est réalisée par rapport au vecteur de pondérations  $\lambda \geq 0$  (rendements d'échelle constants) éventuellement astreintes à une somme comprise entre 0 et 1 (rendements d'échelle décroissants) ou égale à 1 (rendements d'échelle variables). Dans la figure 8 la distance horizontale à la frontière  $\mathbf{x}_0 - \varepsilon\mathbf{x}_0 = (1 - \varepsilon)\mathbf{x}_0$  mesure donc l'économie d'inputs réalisable par une production efficace des outputs  $\mathbf{y}_0$ . Partant, pour une unité efficace  $\varepsilon = 1$  tandis que pour une unité inefficace  $\varepsilon < 1$ . Le facteur de réduction proportionnelle des inputs  $\varepsilon$  mesure donc, sur une échelle sans dimension, croissante et comprise entre 0 et 1, le degré d'efficacité productive de l'unité analysée, cette efficacité étant d'autant plus élevée que ce degré est proche de 1.

### L'efficacité productive qui augmente les outputs

Dans ce cas on cherche l'augmentation proportionnelle maximale des quantités d'outputs, soit le vecteur  $\mu\mathbf{y}_0$ , où  $\mu \geq 1$  désigne le facteur d'augmentation, réalisable par une unité efficace utilisant la même quantité d'inputs  $\mathbf{x}_0$ . Ce facteur d'augmentation des outputs est ainsi déterminé par le programme d'optimisation suivant :

$$\begin{array}{l} \text{minimiser } \mu \\ \text{sous / contraintes : } \mathbf{x}_0 \geq X\lambda, \mu\mathbf{y}_0 \geq Y\lambda \end{array} \quad \text{équ. 77}$$

La maximisation étant réalisée, comme précédemment, par rapport au vecteur de pondérations  $\lambda \geq 0$  (rendements d'échelle constants) éventuellement astreintes à une somme comprise entre 0 et 1 (rendements d'échelle décroissants) ou égale à 1 (rendements

d'échelle variables). Dans la figure 8, la distance verticale à la frontière  $\mu y_0 - y_0 = (\mu - 1)y_0$  mesure donc l'accroissement d'outputs réalisable par une production efficace utilisant les inputs  $x_0$ . Partant, pour une unité efficace  $\mu = 1$  tandis que pour une unité inefficace  $\mu > 1$ . Afin de mesurer le degré d'efficacité productive de l'unité analysée sur une échelle sans dimension, croissante et comprise entre 0 et 1, il convient d'envisager l'inverse du facteur d'augmentation des outputs, soit la grandeur  $e = \frac{1}{\mu}$ . Cette efficacité est alors, comme la précédente, d'autant plus élevée que ce degré  $e$  est proche de 1.

### L'efficacité productive généralisée

Une notion plus générale d'efficacité productive est obtenue en combinant la réduction des inputs avec l'augmentation des outputs. En posant par exemple  $e = \varepsilon$ , on définit un degré d'efficacité productive généralisée par la solution du programme d'optimisation suivant :

$$\begin{aligned} & \text{minimiser } \varepsilon \\ & \text{sous / contraintes : } \varepsilon x_0 \geq X\lambda, (1/\varepsilon)y_0 \leq Y\lambda \end{aligned} \qquad \text{éq. 78}$$

Dans la figure 8 la distance diagonale à la frontière  $x_0 - \varepsilon x_0 = (1 - \varepsilon)x_0$  et  $(1/\varepsilon)y_0 - y_0 = ((1/\varepsilon) - 1)y_0$  mesure donc la réduction d'inputs conjointement avec un accroissement d'outputs réalisable par une production efficace.

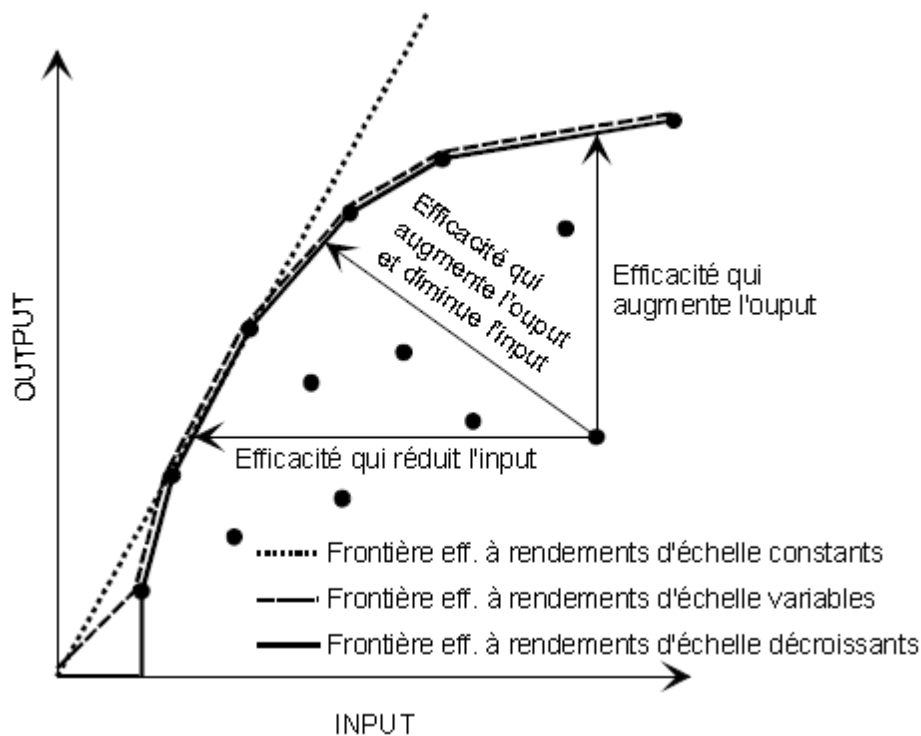


Figure 9 : frontière efficace

Les développements récents de la DEA prennent en compte l'impact environnemental des activités analysées et considèrent que ces dernières produisent en plus des outputs désirables un ensemble d'outputs qualifiés d'indésirables (émissions nocives, déchets, pollutions).

Une première proposition consiste à décomposer le problème en étudiant séparément l'efficacité productive de l'efficacité environnementale. L'efficacité productive fait alors référence à la frontière de production conventionnelle exprimant la relation optimale entre inputs et outputs désirables. L'efficacité environnementale, en revanche, est établie dans l'espace des outputs seulement, sur la base d'une frontière de production où les outputs indésirables jouent le rôle d'inputs et les outputs désirables ceux d'outputs. Ces deux efficacités peuvent à leur tour être combinées dans une mesure plus globale de l'efficacité, en envisageant les efficacités productive et environnementale comme deux outputs d'une activité productive utilisant un input unitaire et en recherchant l'efficacité productive de cette activité virtuelle.

Une seconde approche, qui autorise une analyse plus approfondie des causes de l'efficacité environnementale semble mieux adaptée à l'intégration de la problématique du développement durable, car elle prend en considération simultanément les inputs et les deux

types d'outputs. Différentes mesures globales de l'efficacité basées sur la méthode DEA peuvent alors être envisagées<sup>32</sup>, notamment :

- par une réduction de l'utilisation des inputs seulement, les quantités d'outputs (désirables et indésirables) restant inchangées ;
- en assimilant les outputs indésirables à des inputs et en recherchant la réduction des inputs et des outputs indésirables, la production d'outputs désirables étant gardée fixe ;
- en assimilant les outputs désirables à des inputs et en recherchant la réduction des outputs indésirables, les inputs et les outputs désirables étant contrôlés ;
- par l'augmentation de la production d'outputs désirables, les inputs et les outputs indésirables étant fixés.

Des mesures généralisées de l'efficacité peuvent aussi être envisagées en recherchant simultanément à réduire les inputs et les outputs indésirables et à augmenter les outputs désirables.

La mesure des performances environnementales d'unités de production basée sur le concept d'efficacité productive peut s'appliquer également pour positionner d'autres unités, par exemple des pays, par rapport à la meilleure pratique observée. Dans le contexte du développement durable, il faut, en plus des dimensions environnementales (output indésirable) et économiques (input et output désirables), intégrer la dimension sociale. Il est possible de le faire par des méthodes équivalentes, c'est-à-dire que les paramètres sociaux sont traités comme les paramètres environnementaux. Cette démarche n'est toutefois admissible que pour des unités ou pays présentant un niveau de développement comparable. De même que l'efficacité productive ne permet pas de comparer des unités de production utilisant des technologies différentes, on ne saurait définir une même frontière pour un pays très pauvre et un pays riche. Pour des niveaux de développement socio-économique très différents, il conviendra dès lors de définir des frontières différentes.

Des travaux actuellement en cours proposent d'utiliser la DEA comme procédure d'agrégation des divers indicateurs qui composent l'Indice du Développement Humain (IDH)

---

<sup>32</sup> Cf. notamment Korhonen et Luptacik (2000), Tyteca (1996), Allen (1999) et Dyckhoff et Allen (2001).

calculé par le Programme des Nations Unies pour le Développement. L'IDH est une somme pondérée d'indicateurs individuels très divers (PNB par habitant, espérance de vie, taux d'alphabétisation, émissions de CO<sub>2</sub>, etc.). Il dépend de manière cruciale du choix des pondérations, ce qui le rend politiquement sensible et qui comporte un risque de manipulations. Dans ce contexte la méthode DEA présente l'avantage de fournir un indice composite dont les pondérations sont déterminées de manière endogène par la méthode<sup>33</sup>.

#### **4.2.2 Les méthodes multicritères**

Approcher le développement durable dans toute sa globalité implique la définition de critères et d'objectifs souvent conflictuels et non commensurables. Une analyse comparative des performances dans l'espace et dans le temps doit être à même d'intégrer de tels critères et objectifs.

Les méthodes multicritères d'aide à la décision ont précisément été développées pour traiter des problèmes à objectifs multiples tout en considérant des critères très divers et souvent antagonistes. Comme leur nom l'indique, ces méthodes se sont développées pour aider le décideur à affiner son processus de décision en examinant la cohérence et la logique de ses préférences. Elles s'utilisent également pour allouer des ressources ou pour planifier des projets.

Ces méthodes ont par ailleurs également prouvé leur pertinence en analyse comparative, c'est-à-dire pour le classement de performances globales lorsque les entités concernées poursuivent des missions complexes pouvant présenter des aspects contradictoires, ce qui plaide en faveur de leur utilisation pour comparer des performances en terme de développement durable. Les méthodes d'analyse multicritères sont nombreuses et diverses. Elles se distinguent dans la façon d'effectuer la synthèse de l'information. Toutes comportent quatre grandes étapes, dont les trois premières sont communes à toutes les méthodes et ne présentent que de faibles variations<sup>34</sup>. Ces étapes sont les suivantes :

- dresser la liste des actions potentielles,
- dresser la liste des critères à prendre en considération,

---

<sup>33</sup> Une discussion des premiers résultats de ces travaux est donnée dans Mahlberg et Obersteiner (2001).

<sup>34</sup> Pour une introduction succincte aux méthodes multicritères d'aide à la décision voir Ben Mena (2000) et pour présentation détaillée des différentes méthodes voir Roy (1985) et Maystre *et al.* (1994).

Ces critères découlent des conséquences des actions et permettent au décideur d'exprimer ses préférences. La définition des différents types de critères fait appel aux notions d'indifférence, de préférence stricte, de préférence faible ou de non-comparabilité. L'ensemble des critères devra former une famille cohérente, c'est-à-dire respecter des exigences d'exhaustivité, de cohésion et de non-redondance (Roy (1985)). De nombreuses méthodes demandent d'affecter des poids ou des coefficients d'importance aux différents critères.

- Etablir le tableau des performances (ou matrice d'évaluation).

Ce tableau renferme l'ensemble des évaluations de chaque action selon chaque critère ainsi que des informations complémentaires telles que des seuils et des poids éventuels.

- Agréger les performances.

Il s'agit d'établir le modèle des préférences globales sur l'ensemble des actions potentielles. Les méthodes d'agrégation présentent une grande diversité, et leur choix dépendra des exigences de l'utilisateur. Trois approches opérationnelles peuvent être distinguées, soit :

- l'approche du critère unique de synthèse évacuant toute non-comparabilité (agrégation complète). Elle suppose que tous les jugements sont commensurables et transitifs,
- l'approche du surclassement de synthèse acceptant la non-comparabilité et l'intransitivité (agrégation partielle). Dans cette approche, la technique consiste à comparer les actions deux à deux et à vérifier si, selon certaines conditions, l'une des deux actions surclasse l'autre ou pas. À partir de toutes ces comparaisons, on tente ensuite de réaliser une synthèse. Les méthodes d'agrégation partielles se différencient par leur façon de réaliser ces deux étapes. Ces méthodes d'agrégation partielle peuvent couvrir aussi bien des problèmes de choix, de tri ou de classement d'actions. Elles ont donné lieu à de très nombreuses applications dans le domaine de la gestion de l'environnement,
- l'approche du jugement local interactif avec itération essai-erreur (agrégation locale et itérative). Cette technique s'applique à des ensembles d'actions potentielles très grands, voire infinis lorsque les actions varient en continu. Partant d'une solution de départ, on cherche dans son voisinage s'il n'y en a pas de meilleures et ce de manière répétitive.

La figure 9, tirée de Maystre *et al.* (1994), présente les méthodes et les approches auxquelles elles s'attachent. Cette figure illustre le foisonnement des méthodes multicritères dont certaines comportent de nombreuses variantes. Cette abondance pose le problème du choix de la méthode adéquate, choix qui dépendra évidemment du type de résultats souhaités, de la qualité et de la quantité de l'information disponible. Rousseaux et Apostol (2000) rappellent par ailleurs que le choix de la méthode adéquate est lié à la manière dont les critères interagissent entre eux. Ils proposent trois notions qui permettent d'appréhender cette interaction et de faciliter le choix de la méthode. Ces trois notions sont :

- le choix d'un type de compensation, c'est-à-dire de la manière dont une mauvaise évaluation dans un critère peut être compensée ou non par une bonne évaluation dans un autre critère. L'agrégation globale est l'exemple type d'une méthode fortement compensatoire, ce qui n'est pas le cas pour les méthodes d'agrégation partielles qui sont des méthodes non compensatoires. Pour ce qui concerne l'environnement et *a fortiori* le développement durable, les méthodes compensatoires ne conviennent pas, car elles permettraient de compenser, par exemple, un impact grave sur l'environnement par une bonne performance économique.

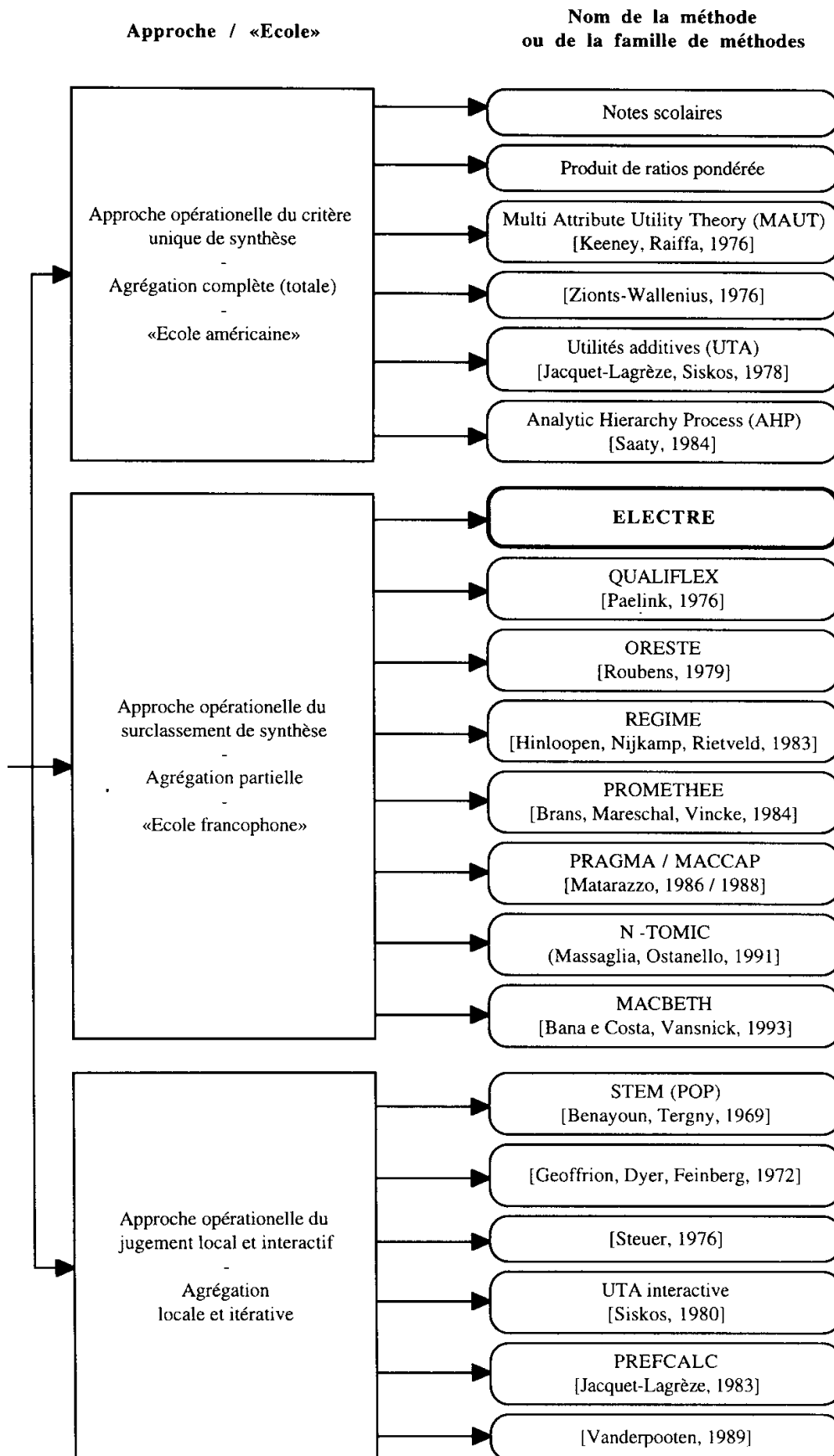


Figure 10 : approches opérationnelles et méthode

- Le choix primordial des coefficients de pondération. Les acteurs concernés par les problèmes du développement durable sont d'accord pour dire que tous les impacts n'ont pas le même poids ; cependant l'obtention d'un consensus autour des poids relatifs est souvent difficile. Dans le domaine de l'environnement, différentes procédures ont été proposées pour établir ces poids ; tenir compte de l'opinion publique à l'aide de sondages, tenir compte de l'état bio-physico-chimique ou recourir à une approche économique consistant à choisir les coefficients en fonction du coût sociétal de la pollution. Mais quelle que soit l'approche choisie, une part de subjectivité est inhérente au choix des coefficients de pondération. « L'important reste cependant de pouvoir identifier clairement la part de subjectivité et la part d'objectivité ». (Rousseaux et Apostol (2000)).
- L'indépendance des critères. Si certains critères interagissent sur la décision finale, il faut trouver une solution permettant de tenir compte de cette interaction. Une solution envisageable consiste à agréger les critères interactifs par une méthode d'agrégation globale prenant en compte les interactions.

Avant de poursuivre plus avant, revenons un instant sur les agrégations complètes. Les travaux de Bergson, Samuelson et Lesourd ont permis l'introduction d'une fonction d'utilité collective qui serait une fonction des utilités individuelles. En pratique, la construction de cette fonction d'utilité collective pose de nombreuses difficultés. En particulier, elle repose sur l'hypothèse des utilités cardinales qui, par l'absence d'échelle objective de la mesure de l'utilité a poussé Pareto à proposer une formulation en termes d'utilité ordinale.

Par leur caractère non compensatoire et leur capacité à intégrer des performances non-comparables et intransitives, les méthodes d'agrégation partielle sont le mieux adaptées pour des problématiques de développement durable.

Parmi ces méthodes d'agrégation partielle, le choix d'une méthode particulière ou d'une de ses variantes dépend de la problématique et des informations disponibles. Ces méthodes se classent selon trois grandes problématiques :

- choix de l'action ou de l'ensemble d'actions le plus adéquat. Pour ce problème de décision on aura recours à la méthode Electre I et à ses variantes. Electre I transforme les performances en notes, Electre IV utilise les vraies valeurs munies d'un veto et Electre IS définit des seuils de préférence et d'indifférence pour chaque critère.

- effectuer un tri des actions, c'est à dire scinder les actions en des classes définies à l'avance. La Trichotomie de Moscorola et Roy trie les actions en bonnes, douteuses et mauvaises, tandis que Electre TRI permet de traiter un nombre plus élevé de classes.
- classer les actions et les regrouper en classes d'équivalence qui ne sont pas préalablement définies. En présence de pondérations des critères on appliquera Electre II, tandis qu'Electre III permet d'intégrer des notions floues et d'effectuer un surclassement avec un indice de crédibilité. En l'absence de pondérations des critères, on aura recours à Electre IV. D'autres méthodes permettent d'intégrer des valeurs ordinales pour les critères (Qualiflex ou Oreste) ou de remplacer le surclassement par une notion de préférence large (Prométhée).

### **4.3 Applications**

#### **4.3.1 Analyse de l'efficacité environnementale d'un ensemble de pays par la méthode DEA**

Pour illustrer l'utilisation de la DEA pour établir un benchmarking incluant aussi bien des activités économiques que leurs impacts environnementaux, nous avons retenu le modèle proposé par Tyteca (1996).

Ce modèle fait la distinction entre outputs désirables et outputs indésirables, en postulant une disponibilité forte pour les outputs désirables, c'est-à-dire la possibilité de produire moins avec la même quantité d'inputs. Par contre les outputs indésirables sont supposés faiblement disponibles, c'est-à-dire qu'une diminution des outputs indésirables implique nécessairement une augmentation des inputs ou une réduction des outputs désirables.

Si l'on s'intéresse spécifiquement à l'efficacité environnementale, ces hypothèses justifient que l'on envisage les outputs désirables comme des inputs utilisés dans la production des outputs indésirables. Pour mesurer l'efficacité environnementale, il convient alors d'envisager la réduction proportionnelle des quantités d'outputs indésirables réalisable par une unité efficace, utilisant les mêmes quantités d'inputs et produisant les mêmes quantités d'outputs désirables que l'unité analysée. Dans cette optique, on admet implicitement que l'efficacité productive ou technique, c'est-à-dire l'utilisation optimale des inputs pour atteindre un certain niveau d'outputs désirables, est réalisée.

En pratique, la mesure de cette efficacité environnementale est réalisée par la résolution du problème de programmation linéaire suivant :

minimiser  $\varepsilon$

sous / contraintes :  $x_0 \geq X\lambda, y_0 \leq Y\lambda, \varepsilon z_0 \geq Z\lambda, \lambda \geq 0$

*équ. 79*

- $x_0, y_0, z_0$  désignent, dans l'ordre, les vecteurs des quantités d'inputs, d'outputs désirables et d'outputs indésirables de l'unité analysée,
- $X, Y, Z$  les matrices des vecteurs des quantités d'inputs, d'outputs désirables et d'outputs indésirables des unités de l'échantillon,
- $\lambda$  est le vecteur des niveaux d'activité figurant dans la combinaison linéaire d'unités de l'échantillon définissant l'unité efficace à laquelle l'unité analysée est comparée,
- $\varepsilon$  est le degré d'efficacité environnementale de l'unité analysée, mesuré d'après une échelle sans dimension croissante et comprise entre 0 et 1, soit  $\varepsilon = 1$  pour une unité efficace et  $\varepsilon < 1$  pour une unité inefficace.

Cette mesure d'efficacité repose sur une frontière de production qui admet des rendements d'échelle constants. Des mesures basées sur des frontières de production caractérisées par des rendements d'échelle décroissants ou variables s'obtiennent en ajoutant au programme linéaire précédent une contrainte linéaire supplémentaire sur les niveaux d'activité  $\lambda$ , à savoir :  $\mathbf{1}'\lambda \leq 1$ , pour des rendements d'échelle décroissants, respectivement  $\mathbf{1}'\lambda = 1$ , pour des rendements d'échelle variables, où  $\mathbf{1}'$  désigne le vecteur colonne unitaire transposé en ligne.

Pour illustrer cette méthode, nous avons eu recours à la base de données fournie par le rapport mondial sur le développement humain publié par le Programme de Nations Unies pour le développement (PNUD)<sup>35</sup>, dans laquelle nous avons sélectionné un ensemble d'indicateurs et de pays pour deux années de référence. Ce choix a été principalement dicté par la disponibilité des indicateurs pour les pays et les années considérés.

---

<sup>35</sup> Les données sont disponibles dans l'annexe A.

Les indicateurs retenus sont donnés dans le tableau 2, les variables étant celles du modèle de calcul de l'efficacité environnementale.

Tableau 2 : Indicateurs retenus

Indicateurs	Variables
<b>effets sur l'environnement, l'économie et la société</b>	
consommation d'énergie commerciale (en tonne équivalent pétrole par habitant)	input
consommation d'eau (en m3 par habitant)	input
combustible nucléaire irradié (en kg par 1000 habitants)	output indésirable
émissions de CO2 ( en tonne par habitant)	output indésirable
déchets ménagers (en kg par habitant)	output indésirable
taux de chômage (en %)	output indésirable
<b>activité</b>	
PIB (en \$ par habitant).	output désirable

Les pays sélectionnés sont: Canada, Norvège, États-Unis, Japon, Belgique, Suède, Australie, Pays-Bas, Islande, Royaume-Uni, France, Suisse, Finlande, Danemark, Autriche, Nouvelle-Zélande, Irlande, Espagne, Grèce, Portugal et Hongrie. Les années de références sont 1991 et 1997<sup>36</sup>.

---

<sup>36</sup> Pour certains indicateurs le rapport du PNUD ne fournit pas l'observation de l'année de référence, mais celle de l'année précédente, ou une évaluation moyenne pour une période de quelques années. C'est pourquoi, nous avons retenu ces deux années de référence pour une analyse de l'évolution dans le temps de l'efficacité environnementale des pays.

Les classements obtenus sont donnés dans le tableau 3 :

Tableau 3 : Classement des pays par degré d'efficacité environnementale selon la méthode DEA

1991	rang	degré d'efficacité	1997	rang	degré d'efficacité
Autriche	1	1.00	Autriche	1	1.00
Belgique	1	1.00	Danemark	1	1.00
Danemark	1	1.00	Irlande	1	1.00
France	1	1.00	Islande	1	1.00
Islande	1	1.00	Norvège	1	1.00
Portugal	1	1.00	Nouvelle-Zélande	1	1.00
Suède	1	1.00	Portugal	1	1.00
Suisse	1	1.00	Suède	1	1.00
Espagne	2	0.84	Suisse	1	1.00
Japon	3	0.84	Japon	1	1.00
Nouvelle-Zélande	4	0.79	Finlande	2	0.99
Royaume-Uni	5	0.68	Royaume-Uni	3	0.98
Finlande	6	0.65	Belgique	4	0.94
Norvège	7	0.63	Espagne	5	0.91
Pays-Bas	8	0.61	France	6	0.88
Canada	9	0.55	Pays-Bas	7	0.85
Irlande	10	0.55	États-Unis	8	0.84
États-Unis	11	0.51	Grèce	9	0.77
Australie	12	0.46	Australie	10	0.65
Grèce	13	0.45	Canada	11	0.62
Hongrie	14	0.41	Hongrie	12	0.33

Plus que le rang, dont le caractère informatif est limité, c'est le degré d'efficacité qui doit retenir l'attention. Pour l'année 1991 on distingue trois groupes de pays : les pays efficaces (degré d'efficacité égal à un), les pays présentant un potentiel d'amélioration moyen (degré d'efficacité compris entre 0.6 et 1) et les pays à fort potentiel d'amélioration (degré d'efficacité inférieur à 0.6). Par exemple, le degré d'efficacité de 0.51 des États-Unis indique que ce pays pourrait réduire de moitié son impact sur l'environnement tout en atteignant le même niveau de PIB par habitant (output) et en utilisant les mêmes quantités de ressources.

Les degrés d'efficacité obtenus pour l'année 1997 situent ces pays par rapport à la frontière de meilleure pratique de cette même année et ne doivent pas être mis en relation avec les degrés d'efficacité de l'année 1991 qui mesurent, quant à eux, la distance par rapport à la frontière de 1991. La France, par exemple, fait partie des pays efficaces en 1991 alors que son degré d'efficacité est de 0.88 en 1997. Cela ne signifie pas nécessairement une augmentation des impacts environnementaux en France sur cette période, mais indique

qu'en 1997 – eu égard aux potentiels techniques observés dans l'ensemble de ces pays – la France aurait pu faire mieux.

Pour les deux périodes d'observation, on ne constate pas de modification radicale du classement des différents pays. Le coefficient de corrélation de Spearman qui mesure la corrélation entre les classements est de  $r_s = 0.65$ .

Les pays dont le classement est le plus fortement modifié sont, d'une part, la Norvège et l'Irlande qui, partant d'un classement relativement mauvais, accèdent au statut de pays efficaces, et d'autre part, la France et la Belgique, efficaces en 1991, se retrouvent dans la deuxième moitié du classement en 1997.

On notera que le nombre important de pays de rang 1 (c'est-à-dire ayant un degré d'efficacité égal à 1) est inhérent à la méthode, car plus il y a d'inputs, plus il y a de risques qu'un pays ne soit dominé par aucun autre. L'ajustement d'une frontière convexe à un nuage de points dans un espace de dimension  $n$ , où  $n$  est le nombre total de variables, passe nécessairement par un nombre de points au moins égal à  $n$ .

#### **4.3.2 Analyse de l'efficacité environnementale d'un ensemble de pays par la méthode ELECTRE**

Dans cette section nous illustrons l'utilisation de la méthodologie d'aide à la décision multicritère présentée ci-dessus par une application basée sur les mêmes indicateurs et pays analysés par la méthode DEA dans la section précédente. Il s'agit d'établir, à partir des indicateurs disponibles, assimilés à des critères de décision, un classement des pays, sans faire appel à des coefficients de pondération des critères. Nous avons retenu la méthode Electre IV, qui est la méthode spécifiquement adaptée à ce type de problématique. Dans notre application, la comparaison des scénarios est assimilée à une comparaison entre pays et ne fait pas référence à des actions potentielles.

La comparaison de deux scénarios fait apparaître diverses situations de préférence qui peuvent être modélisées par des relations binaires. La théorie classique de la décision ne distingue que deux situations différentes : la préférence et l'indifférence. Pour remédier au manque de réalisme de cette simple dichotomie, la méthode Electre propose quatre situations fondamentales de préférence dans la comparaison de deux scénarios.

Pour tout couple de scénarios (a,b) une et une seule des situations d'indifférence, de préférence stricte, de préférence faible ou d'incomparabilité est vérifiée. Celles-ci sont représentées par les relations binaires suivantes :

a I b : a est indifférent à b;

a P b : a est strictement préféré à b (b P a : b est strictement préféré à a);

a Q b : a est faiblement préféré à b (b Q a : b est faiblement préféré à a);

a R b : a est incomparable à b si aucune des trois situations précédentes n'est vérifiée.

Ces quatre relations binaires, ainsi que les trois suivantes, constituées du regroupement des précédentes, soit :

S (surclassement) :  $S = P \cup I$

> (préférence au sens large) :  $> = P \cup Q$

~ (non préférence) :  $\sim = I \cup R$ ,

permettent de modéliser toutes les situations de préférence rencontrées dans notre application.

Les différentes variantes d'Electre se distinguent dans la manière de modéliser ces préférences. Electre III et IV introduisent des seuils d'indifférence et de préférence stricte sur les critères servant à la comparaison des scénarios alternatifs. Le seuil d'indifférence  $q_j$  est tel que si la différence entre les valeurs observées du critère correspondant est inférieure à  $q_j$  alors les deux scénarios sont considérés comme équivalents. Le seuil de préférence  $p_j$  est tel que si la différence entre les valeurs observées est supérieure à  $p_j$  alors un scénario est strictement préféré à l'autre. Si la différence entre les valeurs observées est comprise entre ces deux seuils, il y aura une préférence faible. Le seuil d'indifférence peut être interprété comme la marge d'incertitude minimale liée aux calculs, respectivement comme la marge maximale pour le seuil de préférence. L'ensemble constitué par un critère et son seuil d'indifférence et de préférence est appelé pseudo-critère<sup>37</sup>.

Pour chaque critère on définit un seuil de veto  $n_j > p_j$  tel que si la différence entre les valeurs observées du critère correspondant est supérieure à  $n_j$ , alors le scénario correspondant ne peut en aucun cas être mieux classé, et ce, quelles que soient les observations pour les autres critères.

---

<sup>37</sup> Pour une discussion de l'utilisation des pseudo-critères dans Electre III et IV pour des problèmes environnementaux, voir Hokkanen et Salminen (1997).

La méthode Electre IV s'applique lorsqu'il n'est pas possible d'attribuer des poids aux critères. Ceux-ci doivent alors respecter l'hypothèse de disparité limitée, aucun critère n'a, à lui seul, une importance supérieure ou égale à celle d'une coalition rassemblant au moins la moitié des critères.

A partir de l'ensemble des pseudo-critères du problème, la méthode Electre IV utilise les outils de la théorie des graphes pour construire deux pré-ordres complets de scénarios, l'un allant du meilleur au pire et l'autre procédant dans l'ordre inverse. Le pré-ordre partiel final résultant de l'intersection de ces deux pré-ordres fournit le classement recherché. Ce classement final met en évidence les non-comparabilités entre scénarios, lorsqu'elles existent.

Pour illustrer les différents seuils d'un pseudo-critère, considérons les observations pour 1991 de l'indicateur « taux de chômage » données dans le tableau 4 :

*Tableau 4: Taux de chômage, 1991*

Canada	10.20
Norvège	5.50
États-Unis	6.60
Japon	2.10
Belgique	7.70
Suède	2.70
Australie	9.50
Pays-Bas	7.00
Islande	1.50
Royaume-Uni	8.90
France	9.40
Suisse	1.30
Finlande	7.50
Danemark	10.60
Autriche	3.50
Nouvelle-Zélande	10.30
Irlande	15.80
Espagne	16.00
Grèce	7.30
Portugal	4.10
Hongrie	8.50

Les seuils choisis sont les suivants :

seuil d'indifférence  $q_j = 0.5$

seuil de préférence stricte  $p_j = 2.5$

seuil de veto  $\eta_j = 8$

Le taux de chômage du Canada est de 10.2, celui du Danemark est de 10.6. Si l'on compare la situation de ces deux pays pour ce critère, on considère qu'ils sont équivalents, car l'écart entre les taux de chômage est inférieur à  $q_j = 0.5$ . Si la différence de taux de chômage entre deux pays est plus grande que 2.5, alors nous considérons qu'il y a une préférence stricte, et que, par exemple, la situation de l'Islande est strictement préférable à celle de la Norvège pour ce critère. Si la valeur est entre ces deux seuils, la préférence est dite faible, ainsi la situation de la Suisse sera faiblement préférée à celle du Japon.

Le seuil de veto signifie que si la différence entre les taux de chômage de deux pays est supérieure à 8 %, telle que par exemple entre les taux de l'Irlande et de l'Islande, alors l'Irlande ne peut pas être mieux classée que l'Islande, quel que soit le résultat pour les autres indicateurs.

Pour l'ensemble des indicateurs, les seuils choisis sont donnés dans le tableau 5.

Tableau 5 : Seuils des différents indicateurs (critères)

Indicateur	Seuil d'indifférence	Seuil de préférence	Seuil de veto
	$q_j$	$p_j$	$v_j$
Taux de chômage en % de la population active	0.5	2.5	10
Émissions de CO <sub>2</sub> en tonne par habitant	0.5	2.5	5
Déchets ménagers en kg par habitant	10	40	250
Consommation d'eau en m <sup>3</sup> par habitant	100	500	1000
Cons. d'énergie commerciale en t d'équivalent pétrole par hab.	0.5	2.5	8
Combustibles nucléaires irradiés en kg par 1000 habitants	10	50	100
PIB par habitant en \$ de 1990	1000	5000	8000

L'application d'Electre IV à ces sept indicateurs permet d'obtenir les classements des pays suivants présentés dans le tableau 6.

Tableau 6 : Classement des pays par rang de durabilité selon ELECTRE

1991		1997	
Rang	Pays	Rang	Pays
1	Autriche	1	Autriche
2	Islande Portugal	2	Japon Suisse Portugal
3	Suède Suisse	3	Danemark Nouvelle-Zélande
4	Danemark	4	Islande Irlande
5	Belgique Finlande	5	Norvège Belgique Suède
6	Japon France Irlande Grèce Hongrie	6	Pays-Bas Royaume-Uni Grèce
7	Norvège États-Unis Pays-Bas Espagne	7	France Finlande Espagne
8	Canada Nouvelle-Zélande	8	États-Unis Hongrie
9	Royaume-Uni	9	Australie
10	Australie	10	Canada

Nous constatons que l'Autriche est classée en tête pour les deux années, la Suisse gagne une place (du rang 3 au rang 2). Le Japon et la Nouvelle-Zélande améliorent considérablement leur classement.

Pour s'assurer de la robustesse des classements obtenus, Maystre *et al.* (1994), proposent de faire varier les différents seuils (indifférence, préférence et veto). Notre objectif n'étant pas d'obtenir le meilleur classement de ces pays, mais d'illustrer une méthode de classement, nous n'avons testé la robustesse du classement en ne faisant varier qu'un seul seuil.

Comme exemple, nous avons relevé le seuil d'indifférence pour le PIB à 3000 pour l'année 1997. Le résultat est le suivant et est donné dans le tableau 7.

Tableau 7 : Classement des pays selon la méthode ELECTRE 97 après variation du seuil d'indifférence du PIB

Rang	Pays
1	Autriche
2	Portugal
3	Japon Suisse
4	Nouvelle-Zélande
5	Royaume-Uni Danemark Irlande
6	Suède Islande
7	Pays-Bas Belgique Norvège
8	États-Unis Grèce Hongrie
9	France
10	Finlande
11	Espagne
12	Australie
13	Canada

On constate que la Suisse et le Japon descendent d'un rang. Ces pays ont un PIB par habitant élevé, 25240 et 24070 respectivement, par rapport au Portugal 14270. Le fait d'accroître la marge d'incertitude minimale implique que le Portugal sort mieux classé que les deux autres pays, compte tenu de son faible PIB.

Afin de vérifier si la différence entre les deux classements de l'année 97 avec des seuils d'indifférence différents est significative, nous avons appliqué le test de Spearman. Le coefficient de corrélation de rang de Spearman entre ces deux classements est  $r_s = 0,94$ . Les classements sont donc très proches et nous pouvons conclure à un classement robuste par rapport à une variation de ce seuil d'indifférence.

### 4.3.3 Comparaison des classements obtenus par ELECTRE et par DEA

Les classements obtenus par les deux méthodes sont récapitulés dans le tableau 8.

Pour 1991, le coefficient de corrélation de Spearman des deux classements est  $r_s = 0.66$ .

Les deux classements sont proches, avec toutefois des différences marquantes pour la Grèce, la Hongrie et la France. Ces différences s'expliquent notamment par le rôle de la variable PIB par habitant. En effet, le PIB par habitant de la France est deux fois supérieur à ceux de la Hongrie et de la Grèce, alors que l'écart des autres variables est nettement

inférieur. Étant donné que le PIB par habitant est le seul output désirable retenu pour la méthode DEA, il n'est pas surprenant qu'il joue un rôle dominant dans le classement obtenu.

Tableau 8: Comparaison des classements DEA et ELECTRE

1991				1997	
DEA		ELECTRE		DEA	ELECTRE
Autriche	1	Autriche	1	Autriche	1
Belgique	1	Islande	2	Danemark	1
Danemark	1	Portugal	2	Irlande	1
France	1	Suède	3	Islande	1
Islande	1	Suisse	3	Norvège	1
Portugal	1	Danemark	4	Nouvelle-Zélande	1
Suède	1	Belgique	5	Portugal	1
Suisse	1	Finlande	5	Suède	1
Espagne	2	France	6	Suisse	1
Japon	3	Grèce	6	Japon	1
Nouvelle-Zélande	4	Hongrie	6	Finlande	2
Royaume-Uni	5	Irlande	6	Royaume-Uni	3
Finlande	6	Japon	6	Belgique	4
Norvège	7	Espagne	7	Espagne	5
Pays-Bas	8	États-Unis	7	France	6
Canada	9	Norvège	7	Pays-Bas	7
Irlande	10	Pays-Bas	7	États-Unis	8
Etats-Unis	11	Canada	8	Grèce	9
Australie	12	Nouvelle-Zélande	8	Australie	10
Grèce	13	Royaume-Uni	9	Canada	11
Hongrie	14	Australie	10	Hongrie	12
				Canada	10

Pour l'année 1997, les classements sont très proches. Le coefficient de corrélation de Spearman est  $r_s = 0.88$ .

#### 4.4 Remarque finale du Chapitre 4

Il ressort de ces applications que le monitoring de type DEA et la méthode d'aide à la décision multicritère Electre permettent d'obtenir des classements très proches. Les deux méthodes présentent un ensemble de propriétés communes :

- elles permettent de classer un ensemble de situations observées, par exemple différents pays, et de suivre et de comparer l'évolution de ces classements ;
- les variables observées peuvent être de nature très diverse aussi bien par leur contenu (pollution, PIB, taux de chômage) que par leur dimension. Il n'est pas

nécessaire de faire des hypothèses sur d'éventuelles relations sous-jacentes entre ces variables ;

- il n'est pas nécessaire de recourir à des coûts externes ou à des analyses contingentes pour attribuer une valeur monétaire aux variables environnementales ;
- ces méthodes peuvent s'appliquer a priori sans connaissance de pondérations pour les différentes variables retenues ;
- le classement se fait par rapport à une « meilleure pratique ». Il dépend de la technologie utilisée au moment des observations. De ce fait il ne tient pas compte du potentiel d'amélioration ;
- les deux méthodes sont faciles à implémenter, à l'aide de logiciel disponible sur le marché (Electre) ou de routines de programmation linéaire existantes (DEA).

L'application de la DEA permet non seulement de fournir un classement, mais donne à travers le degré d'efficacité, une mesure du potentiel d'amélioration par rapport à la meilleure pratique. L'application de cette méthode présente toutefois un certain nombre de problèmes. Ainsi le nombre d'unités efficaces croît avec le nombre de variables. Pour un nombre relativement élevé de variables, il serait alors nécessaire de formuler des hypothèses supplémentaires plus restrictives, notamment sur les rendements d'échelle et la disponibilité des facteurs.

La méthode Electre présente l'avantage de pouvoir tenir compte d'informations complémentaires à celles fournies directement par les données, notamment quant à la précision de ces données. Dans la mesure où elles peuvent être chiffrées, de telles informations peuvent être prises en compte par le biais des différents seuils d'indifférence.

En conclusion, nous avons mis en évidence l'intérêt des approches de benchmarking et multicritères dans le cadre de la comparaison et du classement de plusieurs pays au regard de leur efficacité environnementale. Pour que notre comparaison soit complète, il aurait été intéressant de vérifier le classement obtenu par une somme pondérée, méthode étant considérée comme hautement compensatoire.

Par la suite, nous allons démontrer qu'il est possible d'utiliser les approches multicritères pour le domaine de l'énergie.

## 5 Caractérisation d'indicateurs de développement durable pour les technologies de production d'électricité<sup>38</sup>

### 5.1 Introduction

Aujourd'hui, le choix des modes de production d'électricité devrait nécessairement être basé sur le développement durable (Ferrari *et al.* (2001)), incluant, bien sûr, les impacts environnementaux basés sur une analyse en cycle de vie LCAs (Lesourd et Schilizzi (2003), OECD (1985), Dones *et al.* (2004), Dones *et al.* (2005)).

Le concept de développement durable, datant des années 1980, est issu d'un travail de la communauté internationale (WCED (1987)) et basé sur trois piliers, économique, social et environnemental et définit comme « *a development seeking to meet the needs of the present generation without compromising the ability of future generations to meet their own needs* ».

Nous allons tenter, dans cette partie, de construire une méthode d'aide à la décision pour le choix des modes de production d'électricité, choix conforme aux exigences du développement durable.

Dans la section 5.2 nous présenterons brièvement les différentes filières de production d'électricité. A la section 5.3 nous présenterons les critères utilisés pour le choix des filières. La section 5.4 est dédiée à la présentation des outils de classement multicritères. Les applications numériques se trouvent à la section 5.5.

### 5.2 Les filières de production d'électricité

Nous avons classé les filières de production d'électricité en deux familles, les productions non renouvelables et les renouvelables. Ce chapitre présente brièvement les cycles de vie de chacune de ces filières (Rousseaux et Apostol (2000)).

Seules les technologies de génération d'électricité disponible dans la plupart des pays seront analysées. D'autres modes de production marginaux ou dépendants de conditions

---

<sup>38</sup> • Author Posting. (c) 'Copyright Holder', 2011. This is the author's version of the work. It is posted here by permission of 'Copyright Holder' for personal use, not for redistribution. The definitive version was published in International Journal of Green Energy, Taylor & Francis, Tampa, Volume 6, Issue 3, 2009, pp. 257-267. Doi:10.1080/15435070902880943

particulières, comme le barrage marée motrice ou les centrales solaires de production d'électricité par l'intermédiaire de la vapeur, seront brièvement présentés, mais exclus de notre analyse.

## **5.2.1 Filières non renouvelables**

### Filières du charbon

La première étape consiste en l'extraction du combustible selon deux techniques, à ciel ouvert ou dans des mines souterraines. Les mines à ciel ouvert ont l'avantage de procurer de meilleures conditions de travail aux employés ainsi qu'un meilleur taux de récupération du gisement. Néanmoins, ce mode d'extraction pose des problèmes de restauration de l'ancien écosystème et de l'altération de la qualité des eaux de surface ou des nappes phréatiques. Les mines souterraines ont l'avantage d'exploiter les gisements situés en profondeur. Les impacts environnementaux sont importants, notamment l'affaissement du sol au-dessus de l'exploitation, ainsi que la pollution des eaux lors du traitement du minerai.

Une fois le minerai extrait, on le calibre pour obtenir différentes qualités : le charbon marchand, le mixte, le schlamme et les stérils. Seul le charbon marchand est commercialisé, le reste est stocké dans des terrils.

Le minerai est ensuite transporté par chemin de fer, route, carbo-duc, ou voie fluviale.

Le minerai est souvent stocké sur le lieu de combustion, pouvant entraîner des émissions de poussières dans l'atmosphère ou des lixiviats par la pluie polluant le sol.

La dernière étape consiste en la combustion du charbon qui conduit à la formation de plusieurs composés : des gaz, principalement du CO<sub>2</sub>, du SO<sub>2</sub>, des NO<sub>x</sub> et des COV qui sont rejetés dans l'atmosphère, des résidus solides qui peuvent représenter jusqu'à 15 % de la masse du charbon, des particules d'imbrûlés et des cendres. Une partie de ces déchets solides sont mis dans des centres d'enfouissement, mais une partie de ces particules s'échappe dans l'atmosphère.

### Filières du pétrole

L'extraction du pétrole se fait de deux manières différentes, soit par un puits terrestre, soit en plate-forme offshore. Lors de la récupération, on extrait en même temps de grandes quantités de saumure qui sont par la suite réinjectées dans les profondeurs du puits. Il peut arriver qu'elles soient rejetées dans les océans si la teneur en pétrole n'est pas trop

importante, ce qui a pour conséquences la dégradation de la qualité de l'eau et une modification de la vie aquatique à l'endroit du rejet.

Sur les longues distances, le transport se fait en pétrolier ou en oléoduc. L'impact le plus dangereux et le plus connu des navires-citernes sont les marées noires qui surviennent lors d'une avarie du bateau. On évalue à environ 400'000 tonnes par an la quantité d'hydrocarbures rejetée dans les océans. Dans le cas des oléoducs, les pollutions principales surviennent en cas de rupture de conduite.

Le raffinage du pétrole se fait en plusieurs étapes qui permettent d'obtenir du carburant, des combustibles, des lubrifiants ainsi que des produits de base pour l'industrie pétrochimique. Si le brut contient du soufre, certains produits doivent être désulfurés. On considère que 10 % du pétrole entrant est perdu tout au long de la chaîne de transformation.

La dernière étape est la combustion. Elle entraîne la formation et le rejet de gaz tels que le  $\text{SO}_2$ ,  $\text{NO}_x$ , poussières, HC, CO et le  $\text{CO}_2$ . Il y a également une formation de déchets solides à raison de 5 % de la masse du combustible. Ces déchets solides sont stockés en centre d'enfouissement.

#### Filières du gaz naturel

L'extraction se fait par forage, depuis une plate-forme si le gisement est sous-marin. Pendant cette opération il y a des rejets minimes de gaz naturel, d'oxydes de soufre, d'oxydes d'azote, ainsi que de particules et d'hydrocarbures.

Le gaz est ensuite déshydraté. On enlève aussi toute trace de liquide, de  $\text{CO}_2$ , de  $\text{NO}_2$  et de particules solides. Après un traitement de désulfuration, on y ajoute un agent olfactif afin qu'il devienne détectable.

Le gaz une fois traité est transporté par gazoduc ou par méthanier.

Le gaz est alors stocké dans plusieurs types de réservoirs, soit en cavités salines, soit en nappes aquifères, soit dans d'anciens gisements de gaz épuisés.

Pour cette filière, la combustion émet des poussières, CO,  $\text{NO}_x$ , HC et  $\text{CO}_2$ .

#### Filières du nucléaire

On extrait l'uranium d'un minerai qui en contient au minimum 0.1 %, le seuil de rentabilité. Ensuite on le concentre par un procédé de lixiviation.

Après raffinage, on obtient un oxyde d'uranium impur. Ce produit est alors purifié et transformé en hexafluorure d'uranium ( $UF_6$ ) à l'aide de plusieurs réactions chimiques successives. Dans ce processus, des gaz de réaction ainsi que du fluor peuvent constituer une pollution importante : c'est pourquoi ils sont épurés et le fluor récupéré.

L'enrichissement de l'uranium se fait par diffusion gazeuse ou par ultracentrifugation. Le combustible proprement dit peut alors être fabriqué sous forme d'uranium métal, d'oxyde d'uranium ou d'oxyde d'uranium et de plutonium.

Une fois utilisé, le combustible irradié est stocké provisoirement sur le site de la centrale pendant plusieurs années, puis il est retraité ou directement enterré.

Les déchets produits sur l'ensemble du processus peuvent être classés en fonction de certaines caractéristiques. Chaque étape de traitement produit ses déchets, en particulier lors du traitement du minerai, lors de l'exploitation des centrales et lors du démantèlement des installations. 99 % de la radioactivité provient du combustible usagé.

## **5.2.2 Filières renouvelables**

Toutes les énergies renouvelables sont issues plus ou moins directement du rayonnement solaire. Ces énergies contraignent peu l'environnement, c'est-à-dire que leurs impacts locaux (déchets, rejets toxiques) et globaux (effet de serre) restent limités. Aujourd'hui, le potentiel d'utilisation de ces énergies est largement sous-exploité. Ceci est en partie dû à leurs coûts de mise en place et d'exploitation encore trop importants.

### Filières hydrauliques

Les centrales hydrauliques utilisent la force motrice de l'eau pour produire l'électricité. L'énergie mécanique de l'eau entraîne la roue d'une turbine qui à son tour entraîne un alternateur produisant de l'électricité. Nous distinguons trois types de centrales :

- les centrales avec réservoir qui tirent leur énergie de l'eau stockée dans des barrages en altitude. Elles ont l'avantage de produire de l'électricité à la demande ; on dit qu'elles « produisent de la puissance ». L'impact des barrages touche la faune et la flore en aval, la centrale bloquant en effet le limon et les alluvions qui circulaient en aval;
- les centrales au fil de l'eau, contrairement aux précédentes, ne peuvent pas produire de l'énergie à la demande;

- les microcentrales sont des centrales au fil de l'eau dont la puissance est, en général, inférieure à 1 MW<sup>39</sup>. Elles sont donc aussi soumises aux variations de débit du cours d'eau servant à la production.

En plus de créer des impacts sur les écosystèmes recouverts par l'eau, certaines centrales, en particulier celles avec accumulation, émettent du CO<sub>2</sub> et du méthane issus de la putréfaction de la biomasse accumulée. Ces filières sont en général aussi gourmandes au niveau de l'occupation des sols. Finalement, le dernier défaut de ce type de centrale est que le potentiel d'accroissement de production d'énergie électrique est faible, en particulier sur le continent européen, nous estimons un accroissement possible de seulement 10 %.

Les centrales marées motrices sont basées sur le même principe que les barrages au fil de l'eau. Le flux permet de remplir le réservoir par marée montante et le turbinage a lieu par marée descendante. Actuellement peu de sites sont réellement équipés, nous pouvons signaler comme exemples le site français de la Rance en Bretagne (68 MW de puissance) et le site d'Annapolis au Canada (18 MW).

### Filières solaires

Les photopiles sont constituées de matériaux semi-conducteurs, généralement du silicium, qui transforment directement le rayonnement solaire en énergie électrique.

Les deux principales technologies utilisées sont : celle au silicium cristallin, qui est éprouvée et robuste avec un rendement de 13 % et celle au silicium amorphe qui à l'avantage d'être plus aisée à mettre en œuvre, mais qui a un rendement deux fois plus faible.

Une troisième technologie, encore au stade de développement, est celle à ruban ou en couche mince. Elles ont un coût de mise en œuvre faible, par contre le rendement n'est pas encore suffisant pour pouvoir, actuellement, imaginer une utilisation à grande échelle.

Le grand inconvénient de ces filières est avant tout le coût de mise en œuvre et un rendement par mètre carré relativement faible. Ces technologies sont intéressantes dans les régions du globe où le soleil est généreux. Malheureusement dans beaucoup d'endroits, en particulier pendant la période hivernale, la capacité de production d'électricité de ces centrales est faible.

---

<sup>39</sup> En Suisse, actuellement, la limite est à 10 MW.

Au niveau des polluants, la fabrication nécessite des technologies relativement gourmandes en cadmium qui, en plus, émettent d'importantes quantités de CO<sub>2</sub>.

Le potentiel d'accroissement de ces filières est intéressant. Malheureusement il n'est pas possible de produire de l'électricité à la demande, ce qui relègue cette technologie à un développement marginal pour l'injection directe dans un réseau. Il serait possible de stocker l'énergie produite par l'intermédiaire d'une production d'hydrogène. Cette technologie est actuellement en pleine phase de recherche et semble prometteuse.

Les solutions de concentration solaire avec miroirs, produisant de l'électricité par l'intermédiaire d'une turbine à vapeur, sont possibles pour des sites bénéficiant de conditions climatiques favorables et ayant de la disponibilité en surface de sol. Cela est le cas dans les déserts. Des sites dans le Nevada et en Californie sont les premiers à avoir été choisis comme projets pilotes. Cette technologie est prometteuse, malgré les conditions nécessaires rarement rencontrées aux alentours des grandes agglomérations.

### Filières éoliennes

L'intensité du rayonnement solaire que reçoit la Terre, varie avec la latitude. Cela crée des zones de hautes pressions et des zones de basses pressions. C'est le déplacement des masses d'air des zones de haute pression vers les zones de basse pression, qui rétablit l'équilibre et crée le vent.

Le relief de la Terre influence ce mouvement. Il y a ainsi des endroits plus favorables que d'autres pour l'implantation d'éoliennes : les étendues marines, les zones côtières, certaines plaines et la plupart des régions montagneuses.

Lorsque le vent atteint une force suffisante, il fait tourner une hélice qui à son tour entraîne un alternateur qui va générer de l'électricité.

L'énergie éolienne n'entraîne pas de pollution atmosphérique. Néanmoins, l'aspect visuel ainsi que le bruit des pales peuvent jouer en sa défaveur. De plus, on retrouve les mêmes inconvénients que celles des centrales solaires, c'est-à-dire une impossibilité de stockage possible et de production à la demande. Cela peut poser des problèmes dans le cas où la puissance installée représente une part importante de la production. Les éoliennes ont par contre des rendements au mètre carré plus intéressants que les filières solaires, mais ont un déficit en termes de lieu géographique d'implantation, qui doit pouvoir bénéficier de conditions de vent permettant une rentabilité suffisante.

## Filières géothermiques

A l'intérieur de la Terre, les éléments radioactifs produisent de la chaleur en se décomposant. En partant de la surface de la Terre et en creusant, on constate un gradient géothermique, c'est-à-dire que la température augmente avec la profondeur.

Ce gradient est très inégal selon les régions, dans les régions volcaniques il est tellement important qu'à quelques mètres de profondeur, la température est assez élevée pour faire bouillir de l'eau. Selon la température qui règne dans le gisement géothermique, celui-ci sera plus ou moins adapté à la production de chaleur ou d'électricité.

Cette technologie présente plusieurs inconvénients. D'abord, le rendement est très faible. Puis, il y a des risques de pollution de l'air par l'H<sub>2</sub>S notamment et des risques de pollution du sol, car bien souvent, ces gisements contiennent une grande quantité de métaux lourds dissous. Enfin, une centrale géothermique peut être assez bruyante et lors du forage des puits, la technologie utilisée engendre des minitremblements de terre qui peuvent causer des dégâts aux domaines bâtis proches du forage<sup>40</sup>.

### **5.3 Les critères de classement des filières de production d'électricité**

Pour nous conformer à la notion de développement durable nous avons utilisé trois types de critères, soit :

- les critères économiques représentés par leur rendement technique, leur caractère renouvelable, la capacité de production à la demande, le potentiel d'accroissement de la filière et le prix de production de l'électricité,
- les critères environnementaux représentés par les émissions de plusieurs polluants et les nuisances sonores,
- les critères sociaux représentés par les notions de bien public, d'emprise au sol, de temps de retour énergétique, du nombre de personnes travaillant dans chaque filière énergétique et d'utilisation de ressources énergétiques locales.

---

<sup>40</sup> Ce problème a été rencontré à Bâle lors des derniers essais en 2007.

### **5.3.1 Les critères économiques**

Le rendement énergétique est un critère essentiel : plus le rendement est élevé, moins nous utilisons de ressources d'énergie primaire pour produire une quantité équivalente d'électricité. Le rendement exergétique a été choisi, car il montre l'efficacité réelle de la filière, en tenant compte du deuxième principe de la thermodynamique, fait dont ne tient pas compte le rendement énergétique. Pour plus de détails, voir le Chapitre 2.

Certes, il est important d'utiliser efficacement les énergies primaires, mais pour une grande partie d'entre elles, les stocks sont non-renouvelables. L'indicateur utilisé pour définir le caractère renouvelable d'un stock d'énergie exprimée en années, est sa quantité disponible, connue à ce jour, divisé par la consommation annuelle actuelle. Évidemment pour les sources renouvelables, ce nombre d'années est équivalent à la durée de vie du soleil.

Pour qu'une filière énergétique soit économiquement intéressante, il faut aussi tenir compte de sa capacité de production à la demande. L'électricité est une source énergétique non stockable. L'offre et la demande doivent donc être en tout temps équilibrées. Nous distinguons deux types de filières énergétiques : les filières utilisant l'énergie primaire stockable et les filières pouvant varier rapidement leur puissance (à la hausse ou à la baisse). Par exemple, les filières hydroélectriques avec barrage à accumulation sont des filières stockables et modulables, les filières nucléaires sont des filières stockables, mais non modulables. Les filières solaires comme le photovoltaïque ou l'éolien, sont par définition ni stockables ni modulables.

Certaines filières peuvent très bien être classées selon les trois critères ci-dessus, mais malheureusement n'ont pas ou ont peu de potentiel d'accroissement. C'est le cas par exemple des filières hydroélectriques en Europe. Pour classer les filières énergétiques dans cette optique, nous avons tenu compte de leurs potentiels d'accroissement sur le réseau européen interconnecté (UCTE).

Nous ne pouvons pas parler des critères économiques sans prendre en compte les coûts de production de chaque filière.

### **5.3.2 Les critères environnementaux**

Parmi les impacts environnementaux, nous avons conservé les émissions de polluants, mais également les nuisances sonores, qui réduisent la qualité de l'environnement. Nous chiffrons ces émissions de polluants sur le cycle de vie du combustible. C'est pourquoi on observera des taux de pollution que l'on n'a pas l'habitude de rencontrer dans certaines filières.

Les critères retenus sont ceux communément utilisés dans ce genre de travail et pour lesquels on dispose de chiffres pour la plupart des filières.

Enfin, on pourra remarquer pour certaines filières un manque d'information sur certains points. Pour effectuer l'analyse qui suivra, nous avons estimé les différentes valeurs en fonction des connaissances que nous avons déjà. Par exemple, pour les microcentrales hydroélectriques, nous disposons de très peu de données, mais, dans la mesure où la plupart sont des centrales au fil de l'eau et où nos données sont en g/kWh, nous pouvons raisonnablement affirmer que les valeurs seront équivalentes.

Les données utilisées pour les critères environnementaux sont pour la plupart issues d'une base de données créée par le projet de recherche suisse et européen intitulé *ecoinvent 2000*. Nous prenons cette base de données dans l'état, sans mettre en cause les hypothèses de base servant à la construire.

Emissions de CO<sub>2</sub>. Ce gaz est connu pour être l'un des principaux gaz à effet de serre dont on cherche actuellement à diminuer les rejets au maximum, notamment avec la mise en application du Protocole de Kyoto. On constate que, plus la teneur en carbone du combustible est élevée, plus ce taux est important. Comme précisé plus haut, on retrouve également des émissions de CO<sub>2</sub> dans les filières renouvelables, puisque l'on prend en compte l'intégralité du cycle de vie.

Emissions de Composés Organiques Volatils. Ce sont en général des solvants qui deviennent gazeux à partir de 20° C. Les COV sont des polluants atmosphériques à effet essentiellement indirect. En combinaison avec les oxydes d'azote, ils se transforment plus particulièrement en ozone sous l'effet des rayons solaires et provoquent ainsi le smog estival. Ils sont également nocifs pour l'homme, car ils sont cancérigènes.

Emissions de SO<sub>2</sub>. Ce composé provient principalement de la combustion des énergies fossiles. Il est à l'origine des pluies acides, après réaction chimique avec l'eau. Il est également nocif pour l'homme, car son inhalation fragilise les poumons. Enfin, il favorise la formation de particules, extrêmement nocives pour l'homme.

Emissions de NOx. Ce composé est un résidu de combustion, beaucoup moins dangereux que les particules ou le SO<sub>2</sub>. Il n'existe actuellement aucun lien entre les émissions de NOx et une augmentation de la mortalité.

Les émissions de particules semblent être, à l'heure actuelle, la première cause de mortalité due à la pollution chez l'homme et on ne sait pas encore pourquoi.

La DBO, demande biochimique en oxygène, représente une mesure indiquant la qualité de l'eau.

Le Cadmium est un métal connu pour augmenter les risques de cancer chez l'être humain.

La Radioactivité entraîne des mutations irréversibles chez tous les êtres vivants, comme on a pu le constater lors de catastrophes nucléaires (Tchernobyl, Hiroshima). Ici, on a pris en compte le radon, qui fait partie des substances les plus nocives qui soient.

### **5.3.3 Les critères sociaux**

Le premier critère social utilisé est la non-dégradation de l'énergie primaire (notion de bien public), compris ici dans le sens de non-concurrence dans la consommation d'une énergie primaire. Une éolienne installée quelque part ne consomme pas le vent qui sert à la faire tourner, il est donc possible d'ajouter quelques centaines de mètres plus loin une autre éolienne qui aura exactement les mêmes quantités d'énergie produite. Dans le cas de la consommation d'énergies primaires non renouvelables, le processus de transformation de cette énergie en électricité, dégrade entièrement l'énergie consommée.

Dans l'idéal, l'emprise au sol d'une source d'énergie est minimale, on peut ainsi comparer facilement les énergies renouvelables avec les énergies non renouvelables, ces dernières étant de grosses utilisatrices de terres.

Le temps de retour énergétique. Il correspond au temps nécessaire au remboursement énergétique de la construction de la centrale concernée. Par exemple, l'énergie totale produite par une éolienne sera égale au bout de quelques mois à la quantité d'énergie qu'il aura fallu pour la fabriquer. Contrairement à ce que nous pourrions penser, ce critère a été classé comme un critère social et non-environnemental, car l'utilisation de ressources énergétiques pour construire les infrastructures nécessaires à produire de l'électricité est directement en concurrence avec les consommations d'énergie, donc non disponible pour d'autres utilisations.

Les ressources nécessaires à la construction et à l'exploitation des filières énergétiques sont de deux types, le capital et le travail. Nous avons classé les filières énergétiques en termes d'utilisation de main-d'œuvre. Ce critère représente une manière de redistribuer les profits dégagés par les filières.

Un critère important est le risque d'approvisionnement, qui permet de définir si la ressource primaire est facilement accessible et l'approvisionnement assuré.

Le dernier critère social utilisé est la notion de ressources énergétiques locales qui a pour objectif de valoriser les énergies primaires proches de leur consommation.

#### **5.4 Choix de la méthode de classement**

Comme déjà vu au Chapitre 4, les méthodes multicritères d'aide à la décision ont été développées pour traiter des problèmes à objectifs multiples tout en considérant des critères très divers et souvent antagonistes. Comme leur nom l'indique, ces méthodes se sont développées pour aider le décideur à affiner son processus de décision, en examinant la cohérence et la logique de ses préférences. Elles s'utilisent pour allouer des ressources ou pour planifier des projets, mais elles ont aussi démontré leur efficacité dans l'analyse comparative, en particulier dans le classement de la performance globale d'unités, réalisant des missions complexes et comprenant des aspects contradictoires.

Nous rappelons que les méthodes d'analyse multicritère sont nombreuses et diverses. Elles se distinguent dans la façon d'effectuer la synthèse de l'information. Toutes comportent quatre grandes étapes, dont les trois premières sont communes à toutes les méthodes et ne présentent que de faibles variations. Ces étapes sont les suivantes :

- dresser la liste des actions potentielles,
- dresser la liste des critères à prendre en considération,
- établir le tableau des performances (ou matrice d'évaluation),
- agréger les performances.

Ces méthodes d'agrégation partielles ne compensent pas un mauvais résultat par un bon, elles sont donc capables d'intégrer un fonctionnement intransitif et non-comparable, propriétés indispensables pour des problèmes de développement durable. De plus, nous avons vu qu'elles ont d'autres avantages, comme la possibilité d'utiliser des critères bruts, c'est-à-dire sans devoir les convertir en unité commune.

Pour l'application numérique, il s'agit d'établir, à partir des indicateurs présentés plus haut, un classement des filières de production d'électricité, sans faire appel à des coefficients de pondération des critères. En effet, le choix des pondérations de chaque critère est avant tout un choix politique ; c'est au décideur d'apprécier l'importance de ces critères et pas aux scientifiques, qui ne peuvent que donner, aux politiques, des appréciations basées sur leurs connaissances. La méthode spécifiquement adaptée à ce type de problématique que nous avons retenue est la méthode Electre IV, largement présentée au Chapitre 4. Elle introduit,

pour chaque critère, des seuils d'indifférence et de préférences servant à la comparaison des scénarios alternatifs. Pour chaque critère on définit aussi un seuil de veto  $n_j > p_j$  tel que si la différence entre les valeurs observées du critère correspondant est supérieure à  $n_j$ , alors le scénario correspondant ne peut en aucun cas être mieux classé, et ce, quelles que soient les observations pour les autres critères.

A partir de l'ensemble des pseudo-critères du problème, la méthode Electre IV utilise les outils de la théorie des graphes pour construire deux pré-ordres complets de scénarios, l'un allant du meilleur au pire et l'autre procédant dans l'ordre inverse. Le pré-ordre final résultant de l'intersection de ces deux pré-ordres fournit le classement recherché. Ce classement final met en évidence les non-comparabilités entre scénarios, lorsqu'elles existent.

## 5.5 Application numérique

### 5.5.1 Classement

En plus des données issues d'*ecoinventV1.1*, nous avons constitué une base de données fondée sur les publications académiques et des travaux personnels accumulés depuis plusieurs années. Pour certaines filières, nous avons dû estimer les performances en fonction de celles d'autres filières, ceci par manque de données<sup>41</sup>.

Nous avons utilisé des seuils de veto uniquement pour les critères qui ont une contrainte technique forte, soit les critères du rendement exergétique, du risque d'approvisionnement, de production à la demande et de potentiel d'accroissement de production.

Le choix des seuils s'est fait par rapport aux performances les moins bonnes et ceci pour tous les critères. Les seuils sont donc dit directs.

Tableau 9 : Liste des seuils

		Coef indifférence	Coef préférence	Seuil de veto
Rendement exergétique		2	10	50
Renouvelabilité	1/anné	0.001	0.005	
Production à la demande		1	3	5
Accroissement	Energie	1	3	5
Prix	€/MWh	10	30	
CO2	g/kWh	1	20	
COV	g/kWh	0.001	0.005	
NOx	g/kWh	0.02	0.15	
SO2	g/kWh	0.005	0.06	
Particules < 2.5 m	g/kWh	0.005	0.05	
DBO dans eau	g/kWh	0.002	0.01	
Cd dans sol	ng/kWh	0.5	7	
Radon dans air	kBq/kWh	5	10	
Bien public		2	4	
Occupation des sols	m2/an/kWh	0.0005	0.001	
Temps de retour énergétique	années	0.5	2	
Utilisation de main-d'œuvre		1	3	
Production locale		1	3	

Dans la figure ci-dessous, nous pouvons observer les résultats suivants :

---

<sup>41</sup> Les données sont disponibles dans l'annexe B.

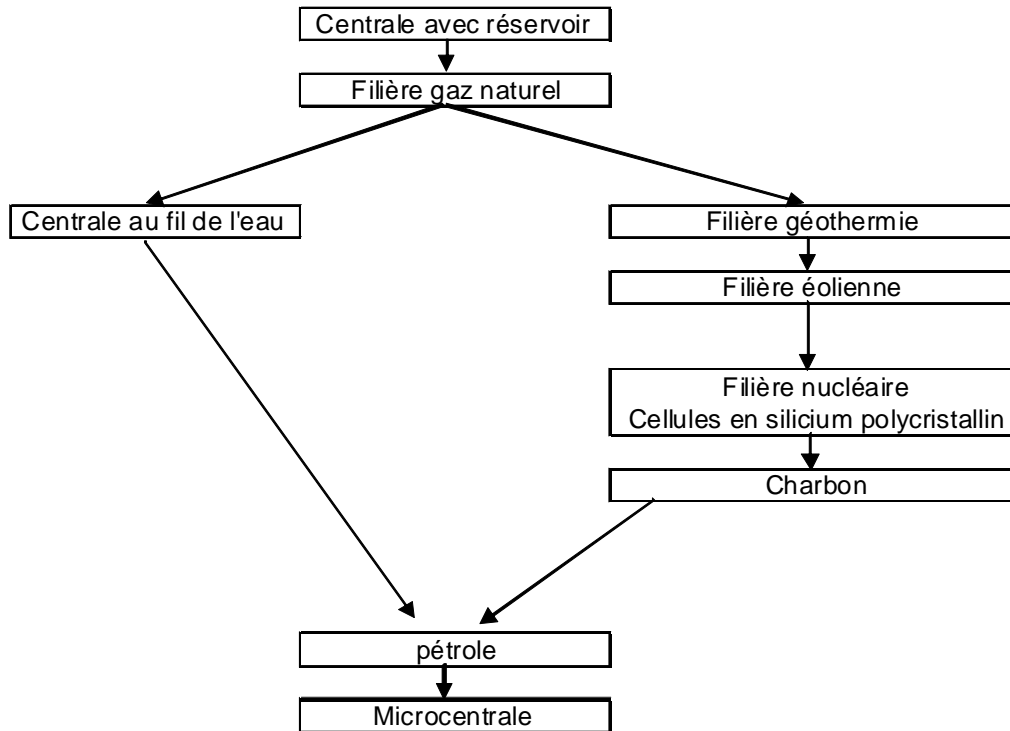


Figure 11 : diagramme de classement final

La filière qui surclasse toutes les autres est la centrale hydraulique avec réservoir, suivie des centrales au gaz naturel. Viennent ensuite l'hydraulique au fil de l'eau et la géothermie. Ces deux filières ne sont pas comparables entre elles et ceci est aussi valable pour les filières surclassées par la géothermie, soit l'éolien qui surclasse deux modes de production comparables, qui sont le nucléaire et le photovoltaïque. Le pétrole est surclassé par toutes les filières sauf les microcentrales hydroélectriques, qui se classent au dernier rang.

### 5.5.2 Analyse de sensibilité

Pour vérifier la robustesse du classement obtenu, nous avons fait varier les coefficients des seuils.

Dans tous les cas de figure, les centrales hydroélectriques restent au premier rang, sauf lorsque nous détendons la contrainte sur le CO<sub>2</sub>. Dans ce cas, la centrale au gaz passe au premier rang. Effectivement, le grand défaut du gaz est l'émission de gaz carbonique, il n'est donc pas étonnant de constater un renversement de classement pour les deux premières filières.

En détendant la contrainte du critère « de possibilité de production à la demande », le nucléaire surclasse le photovoltaïque qui, par définition, dépend entièrement du soleil. Ici

aussi, le résultat paraît logique, car une des carences des filières nucléaires est le manque de réglage de la puissance fournie au réseau. En temps normal, il faut plusieurs jours pour arrêter une centrale de ce type.

Pour le critère « potentiel d'accroissement de la production électrique », le même exercice entraîne une modification du classement de l'éolien et de la géothermie qui surclassent toutes les autres filières excepté l'hydraulique avec réservoir et le gaz.

Les filières de micro-hydroélectricité ont comme principal défaut le coût relativement élevé de l'électricité produite. En modifiant les seuils sur le critère du prix, cette filière n'est alors surclassée que par les deux hydrauliques, le gaz, la géothermie et l'éolien. Cette amélioration de classement se produit également en modifiant les seuils du critère « utilisation de main-d'œuvre » qui inverse le classement entre les microcentrales hydroélectriques et les centrales hydroélectriques au fil de l'eau.

Finalement en modifiant les seuils du paramètre de non-dégradation de l'énergie primaire, la filière nucléaire surclasse alors celle du photovoltaïque.

## **5.6 Remarques finales du Chapitre 5**

L'analyse des filières énergétiques doit nécessairement être faite sur le cycle de vie. Cela permettra d'éviter des biais certains lors du choix des filières. Dans notre étude nous avons été confrontés à la difficulté d'obtenir des données fiables, en particulier pour les filières manquant de transparence, par exemple les filières nucléaires. Cela ne met en aucun cas en doute notre approche. Par contre le classement peut évidemment être modifié en fonction de l'évolution de certaines données.

Concernant les filières analysées, nous devrions nous pencher sur les filières d'agro-carburants qui sont aussi utilisées, marginalement, pour la production d'énergie électrique. Lors de notre étude, nous n'avons pas trouvé de données suffisamment fiables. De plus, il aurait fallu ajouter une notion de concurrence liée non pas aux surfaces disponibles, mais aux filières agricoles. Nous avons pu observer que la transformation de grands domaines agricoles pour la production d'énergie est directement en concurrence avec les productions agricoles vivrières et agro-alimentaires, déstabilisant gravement les équilibres alimentaires de notre planète. Il nous paraît donc inimaginable de pouvoir envisager une filière d'énergie de ce type sans pouvoir résoudre les problèmes de la faim au niveau planétaire. Ces deux remarques nous permettent de justifier l'exclusion de cette filière.

Suite aux différentes catastrophes vécues par les filières énergétiques ces dernières années, il nous paraîtrait nécessaire d'introduire un critère prenant en compte la notion de risque de catastrophe sans oublier qu'un risque n'est pas équivalent à un dommage puisque le risque est probable et le dommage certain. Il paraît évident que les filières renouvelables puissent être avantagées largement en introduisant ce critère. Cependant, l'utilisation de ce critère impose nécessairement l'introduction d'un autre critère qui est la capacité de pouvoir fournir l'offre d'électricité en fonction de la demande. Dans un monde idéal, seules les énergies renouvelables seraient acceptables. Par contre, il est actuellement impensable de pouvoir se passer des énergies non renouvelables, car ce sont elles qui actuellement fournissent plus de 95 % de l'énergie consommée dans le monde. Le potentiel actuel d'énergies renouvelables ne pourra, à court terme, en aucun cas substituer les productions actuelles d'énergies non renouvelables. Il est donc nécessaire de pouvoir réduire nos consommations si nous désirons nous passer de ces dernières. La réduction de nos consommations est un enjeu très important qui mériterait beaucoup plus d'attention dans les recherches académiques.

Concernant le critère d'utilisation des surfaces, il serait intéressant de différencier les surfaces vierges des surfaces déjà bâties. Le toit d'une bâtisse exposé plein sud n'est pas en concurrence avec d'autres utilisations du sol par exemple l'agriculture. Cette distinction avantagerait les potentiels d'énergies renouvelables prévues sur le domaine bâti, par exemple le photovoltaïque.

Un autre critère social qui pourrait être introduit est la notion d'acceptabilité locale. Ces dernières années nous avons vu fleurir beaucoup de projets d'éoliennes, en particulier en Suisse dans le Jura. Ses projets ne devraient poser aucun problème de mise en œuvre ; leur potentiel est intéressant, leur construction relativement simple et l'exploitation peu coûteuse. Alors pourquoi avons-nous tant de problèmes à pouvoir transformer ces potentielles énergies en énergie produite ? Nous sommes confrontés ici au choix difficile entre la production d'énergie renouvelable et la protection du paysage ou la protection contre les nuisances sonores des riverains. On retrouve les mêmes difficultés dans certaines zones de domaine bâti ou pour des raisons de protection de certains bâtiments, les autorités interdisent la mise en place de panneaux solaires.

En conclusion, l'exercice que nous avons réalisé a permis de mettre en évidence les modes de production d'électricité qu'il faudrait promouvoir en priorité.

Nous avons passé rapidement sur le choix des pondérations des critères et ceci non pas par manque d'intérêt pour ce sujet, mais par le fait que le choix de ces dernières doit être

démocratique et basé sur des informations objectives, transmises par les spécialistes de chaque discipline. Par exemple pour le CO<sub>2</sub>, il serait intéressant de prendre en compte deux points de vue, celui des biologistes qui imputent le réchauffement planétaire aux activités humaines, à travers les émissions de CO<sub>2</sub>, et celle des astrophysiciens qui imputent tout ou partie de ce réchauffement climatique à la fluctuation de l'activité solaire. Les pondérations des différents critères permettraient d'observer des classements très différents.

Les critères sociaux ont peut-être été sous-estimés dans notre étude, il serait judicieux de renforcer cette partie dans une prochaine analyse.

L'étude des hypothèses utilisées lors de l'établissement des performances dans le cadre des analyses en cycle de vie, est aussi très importante. Pour affiner notre classement, il serait important de vérifier la pertinence de chacune d'entre elles.



## 6 Conclusion

Ce travail nous a permis de faire le point sur la prise en compte des valeurs non marchandes dans le cadre du développement durable, en particulier pour la production d'électricité.

Nous avons aussi fait un détour par les utilisations possibles de la théorie de la thermodynamique en économie. Excepté la troisième loi, toutes les autres démontrent des implications et des utilisations intéressantes en faveur de l'économie. Malgré le fait que nous nous inscrivons clairement dans une approche empirique, nous espérons avoir démontré que les approches heuristiques, formelles ou paradigmatiques du lien entre l'économie et la thermodynamique peuvent avoir un intérêt scientifique.

Issue du deuxième principe de la thermodynamique, l'entropie a permis de définir une approche qualitative de l'énergie. L'utilisation de l'exergie, définie comme le potentiel maximum de travail fourni par une source énergétique, nous semble inévitable dans le cadre du développement durable, car elle permet d'analyser qualitativement un processus de transformation énergétique. L'exergie permet de mettre en évidence les lacunes des modèles actuels et de proposer des solutions inédites, en particulier dans l'approche du développement durable. Peu de recherches se basent aujourd'hui sur cette approche, malgré le fait que sa pertinence est démontrée. Goran Wall<sup>42</sup> a inventorié l'ensemble des publications qui parlent de l'exergie. Dans les années 1980, il a mis en évidence un « effet de mode » qui correspond à un pic de 130 articles publiés chaque année. Cet engouement baisse malheureusement d'année en année.

Nous avons vu que l'utilisation de l'entropie, comme indicateur physique d'évolution, rend la théorie de la thermodynamique incontournable dans l'approche du développement durable : l'entropie prend en compte la dégradation certaine des stocks d'énergie à hautes valeurs énergétiques et cela s'explique par l'apparition de phénomènes irréversibles issus de la vitesse du transfert de l'énergie entre différents systèmes. Ce phénomène permet la prise de conscience de la valeur finie de ces énergies et l'anticipation de la fin de ces stocks.

La première limite de notre travail se trouve dans le fait que la thermodynamique, loin de l'équilibre, non linéaire et des structures dissipatives dont les premières bases de réflexion ont été établies par Prigogine et Stengers (1986), pourrait peut-être être la source de

---

<sup>42</sup> Voir [www.exergy.se](http://www.exergy.se)

nouvelles théories expliquant certaines complexités de notre réalité, comme l'opposition entre l'apparition de formes naturelles organisées, issue de la pensée de Darwin et la tendance physique à la désorganisation, issue de la pensée de Carnot.

Dans le Chapitre 3 nous avons présenté une méthode qui tient compte du caractère renouvelable de l'énergie, en utilisant la notion exergétique, permettant l'intégration des irréversibilités dans la réflexion du développement durable. Notre application a permis d'évaluer le potentiel théorique de perte de rendement en fonction d'un choix possible de mode de transformation d'énergie, en particulier pour les utilisations du chauffage urbain. Cette approche pourrait être une piste intéressante dans la planification énergétique du territoire, malgré le fait que la substitution d'un chauffage existant par un autre engendre nécessairement des coûts qui doivent être supportables pour nos sociétés. D'autres contraintes apparaissent lorsque nous nous intéressons à la possibilité de changer de mode de transformation d'énergie, par exemple, la lenteur du processus de décision ou la capacité du marché à fournir les technologies idéales. Le choix de ces technologies est possible grâce à l'approche exergétique qui pénalise les processus énergétiques utilisant les transformations thermiques faisant apparaître les plus grandes irréversibilités. Le facteur de Carnot est un concept fondamental qui doit être pris en compte à chaque fois qu'une énergie est en jeu.

Nous avons également présenté l'importance de l'exergie dans la construction des prix de l'énergie, directement liée au potentiel de température que nous pouvons extraire d'une source d'énergie.

Nous avons finalement observé qu'il manquait souvent, dans ce type de réflexion, une prise en compte de la manière d'utiliser l'énergie, c'est-à-dire la nécessité d'utiliser la notion de puissance et la vitesse d'épuisement du stock. Cette vision temporelle ne suffit pas ; il faut aussi prendre en compte une notion de localisation de l'énergie, en particulier pour l'utilisation des énergies renouvelables qui imposent la mise en place de capacités de stockage et de moyens de transport importants. Cette problématique a été prise en compte dans le Chapitre 5 où le critère de production à la demande a été utilisé.

Finalement dans le Chapitre 3, notre vision de la prise en compte binaire du renouvelable est forcément simpliste, car unidimensionnel. Il est donc nécessaire d'avoir une réflexion multidimensionnelle telle que nous l'avons fait dans les Chapitres 4 et 5.

Le Chapitre 4 a mis en évidence l'importance du type d'agrégation choisi. Nous avons démontré les forces et faiblesse de deux approches, l'une faisant appel aux frontières efficaces et l'autre à l'approche multicritère. La prise en compte du caractère

multidimensionnel impose l'utilisation de méthodes permettant une meilleure prise de décision. Nous avons vu que les agrégations simples posent de nombreux problèmes, car il est difficile de trouver une fonction d'utilité sociale issue de la somme des utilités individuelles. Il est donc nécessaire d'approcher ces problèmes multidimensionnels à l'aide d'autres méthodes d'agrégation, ce que nous avons fait avec les approches d'aide à la décision multicritère et des frontières efficaces.

Le choix des méthodes d'agrégation est aussi une limite à notre travail, car comme nous l'avons relevé, les travaux de l'OCDE/JRC (2005) ont démontré qu'une agrégation parfaite n'existe pas. Il faut donc se contenter d'un algorithme conforme à certaines propriétés souhaitables sans qu'aucune propriété essentielle ne soit perdue. Les méthodes présentées ne sont donc pas sans défaut. Mais les deux chemins utilisés permettent aussi de s'affranchir de la contrainte imposée par d'autres méthodes, par exemple la conversion de différentes dimensions en une seule unité. Dans nos approches, chaque domaine du développement durable peut ainsi garder toute son intégrité.

Dans ce chapitre nous avons également démontré l'importance des pondérations de chaque critère et préconisé que ses pondérations peuvent être définies de manière démocratique, même si, comme Condorcet (1786) l'a relevé, il n'est pas certain qu'un vote puisse refléter les préférences sociales. Il n'est pas du ressort du chercheur d'imposer sa vision de ce qui est bon pour la collectivité. La proposition d'une méthode objective et rigoureuse proposant un meilleur choix est déjà une tâche suffisamment importante pour que le même chercheur puisse également assurer un rôle dans la détermination de pondération des critères et définir ce qui est bon pour la société.

Le problème de la méthode Electre est que son classement est uniquement ordinal. Le décideur doit parfois pouvoir obtenir un classement cardinal afin de justifier sa décision, même si une analyse de sensibilité permettra de vérifier la robustesse du classement. Il serait intéressant de trouver une combinaison de plusieurs approches pour avoir les avantages d'un choix rigoureux obtenu par Electre et d'un classement cardinal obtenu par d'autres méthodes.

Au Chapitre 5, nous avons établi un classement des différentes filières de production d'électricité, sur la base de l'analyse en cycle de vie. Cette vision « du berceau au tombeau » évite souvent des conclusions hâtives sur certaines sources d'énergie. Se passer de cette approche serait sans doute une erreur. Nous tenons ici à saluer spécialement l'effort de la communauté scientifique qui a pris conscience de l'importance d'établir des bases de

données accessibles, regroupant l'ensemble des informations et par là, facilitant grandement le type de recherche que nous vous avons présenté.

Si l'objectif, lors de l'évaluation des modes de production d'électricité, est de respecter le développement durable, les approches multicritères sont en effet judicieuses. L'un de ses avantages est de permettre dans un premier temps de délocaliser le choix des critères dans les équipes de spécialistes de chaque dimension du développement durable. Cela éviterait de longues discussions entre experts qui ne parlent pas le même langage. Pour prendre en compte toutes les dimensions du développement durable, nous avons proposé des approches qui pourraient compléter celle utilisée par l'OCDE, par exemple. Nous avons vu que la définition des critères, ainsi que la fixation des poids de chacun, sont déjà compliquées. Mais la plus grande difficulté vient certainement du choix de la méthode de construction d'indices synthétiques. Nous n'avons pas trouvé, ici, une méthode universelle, même si l'approche multicritère semble résoudre une partie du problème, en obtenant un résultat consensuel.

En ce qui concerne le domaine énergétique, saurons-nous trouver le chemin du développement durable ? Pour cela il faudrait acquérir rapidement des connaissances scientifiques afin que nos enfants puissent « se passer du pétrole ». La découverte de nouvelles sources d'énergies renouvelables touchera l'ensemble de l'humanité dans la vie de tous les jours et permettra d'éviter des conflits certains. Ces nouvelles technologies contribueront au respect des générations futures tout en leur donnant la possibilité de continuer à consommer de l'énergie vitale. Est-il possible d'avoir comme objectif le respect de la biosphère et le développement de l'espèce humaine ? La croissance démographique implique de plus grandes contraintes, de plus grands impacts et donc « moins de tout » pour chacun. Quelle société est prête à accepter, sans contrainte, des réductions importantes ? Un Suisse consomme en moyenne 6000 W, alors qu'en respectant une notion d'équité et de partage entre tous les humains de la planète on ne devrait consommer que 2000 W, qui représente actuellement la moyenne des consommations de tous les individus sur terre. Étant donné qu'il est très difficile de réduire notre consommation de 10 %, comment pourrions-nous nous passer d'énergie à court terme ? Dans notre pays, l'atome assure actuellement encore 40 % de l'électricité ! Nous aimerions pouvoir être d'accord avec les personnes qui, suite aux récents problèmes nucléaires survenus au Japon proposent de se passer de nos centrales nucléaires. Nous avons tout de même de la peine à imaginer des solutions respectant le développement durable qui amèneront un équilibre entre écologie, économie et le domaine social, même si nous pouvons observer depuis quelques années un changement dans les consommations d'énergie, du moins dans nos sociétés. De plus en

plus de personnes ont en pris conscience, même si les efforts consentis ne sont certainement pas suffisants pour atteindre les objectifs que nos gouvernements nous ont fixés.

D'autres approches, que nous n'avons pas traitées, permettraient de trouver d'autres pistes pour prendre en compte la valeur de biens non marchands. Nous pensons, par exemple, aux méthodes d'évaluation contingentes, issues des tribunaux américains, cherchant à évaluer la perte de biens non marchands lors de grandes catastrophes écologiques. Cette technique est devenue une référence dans les domaines de l'économie de l'environnement et de l'économie de la culture pour déterminer l'opportunité de certains investissements, de subventions ou encore pour départager deux projets concurrents sur un même site. Mais, comme le signale Weber (2002), l'emploi de déclarations de propensions à payer par les agents eux-mêmes est sujet à caution dans la mesure où les réponses peuvent être influencées par des considérations stratégiques (répondre en deçà de sa vraie évaluation, de peur que l'enquête ne soit utilisée pour évaluer le montant d'un impôt), de statut social (il est mal vu d'accorder peu de valeur à l'environnement), ou ignorant la contrainte budgétaire. Nous voyons que ces méthodes comportent aussi des biais importants. Le choix devra donc être fait en prenant le moindre mal.

La disparition de nos ressources non renouvelables est certes problématique à moyen terme, mais qu'en est-il de la capacité de notre planète à supporter nos émissions provenant des énergies non renouvelables ? Une approche très actuelle permet de prendre en compte l'impact de chacun sur notre planète. L'empreinte écologique évalue la demande de l'Homme en services écologiques fournis par la nature, en mesurant la surface de terre qu'il faut pour obtenir la matière première et l'énergie nécessaire à notre consommation, mais aussi pour absorber les déchets produits. Un Suisse consomme ainsi 2.5 planètes. Cette approche, de type agrégation complète (donc avec de grandes compensations), comporte de multiples lacunes, mais un avantage certain qui est la compréhension par le grand public, ce qui la rend très intéressante. La transmission du savoir en termes plus simples permettra certainement de prendre en compte cette problématique dans nos choix individuels.

Nous espérons que notre recherche permettra de proposer des pistes de réflexion positives pour amener l'humanité à tout mettre en œuvre pour la recherche et le respect du développement durable, spécialement dans le domaine de l'énergie.



## **7 Annexe A : Données Chapitre 4**

Données de l'Agence Internationale de l'Énergie AIE (1997)

1 973					1 974				
US	Japan	Germany	France		US	Japan	Germany	France	
1	471.7948718	133.3333333	276.9230769	276.9230769	1	487.1794872	148.7179487	282.0512821	282.0512821
2	8.6494689	1.7071320	3.9264036	3.7556904	2	8.3459788	1.6881639	3.8694992	3.7367223
3	17.9888060	8.3507463	10.2052239	8.7425373	3	17.7798507	8.3507463	9.9179104	8.5597015
4	3.0924765	2.2068966	1.9326019	1.4976489	4	3.1277429	2.2068966	1.9286834	1.5054859
5	3.1480804	1.2148080	1.6627057	1.3199269	5	3.1435101	1.2148080	1.6444241	1.3199269
6	1.3251429	0.7937143	0.7731429	0.9017143	6	1.2788571	0.8194286	0.7611429	0.8228571
7	0.0427986	0.0630034	0.0519454	0.0537201	7	0.0534471	0.0843003	0.0576792	0.0653242
8	3.2216216	4.7567568	2.6918919	2.6918919	8	3.2108108	4.9729730	2.5189189	2.7135135
9	1.3303887	2.2738516	1.5000000	1.6802120	9	1.2879859	2.3745583	1.3250883	1.6590106
10	0.2353345	0.4130360	0.4394511	0.4622642	10	0.3025729	0.5307033	0.5078902	0.5307033
11	1.3319224	1.0892416	0.5220459	0.6546737	11	1.2952381	1.0666667	0.4994709	0.6546737
12	4.2906574	4.6712803	3.7024221	5.3979239	12	6.0553633	7.6124567	7.4740484	5.5363322
13	2.6848592	13.2482394	13.6883803	14.5686620	13	2.7288732	10.7834507	11.4876761	13.5123239
14	16.0493827	37.6954733	32.5102881	40.1646091	14	16.1316872	35.0617284	32.0987654	38.1893004
15	5.6692913	1.3700787	7.1181102	7.1181102	15	5.1023622	1.4173228	8.0000000	6.7401575
16	1.1278470	0.2617104	0.6667383	0.3987967	16	1.1216158	0.2617104	0.6854319	0.3987967
17	3.8935361	1.7338403	2.9733840	1.7870722	17	3.8250951	1.7718631	2.8517110	1.6501901
18	801.5122873	240.0756144	531.1909263	283.5538752	18	769.3761815	232.5141777	510.3969754	260.8695652
19	2.4619883	1.9590643	2.8596491	1.9883041	19	2.3333333	2.0935673	2.8011696	2.0000000
20	12.5000000	20.2232143	17.9464286	11.1160714	20	12.2767857	19.6428571	19.1071429	11.6071429
21	29.2998205	22.9443447	15.9425494	18.5278276	21	30.7001795	24.0215440	16.3734291	18.6355476
22	100.0000000	100.0000000	100.0000000	100.0000000	22	100.9166667	100.9166667	103.3333333	100.9166667
23	100.0179533	100.0179533	100.0179533	100.0179533	23	104.7935368	100.1436266	100.1436266	101.4003591
24	6.4883303	7.4578097	5.1238779	4.3339318	24	6.5242370	7.2962298	5.1238779	4.4236984
25	1.9533214	1.7235189	1.2926391	1.9102334	25	3.6050269	4.3806104	2.5421903	2.8581688
26	7.7960644	14.3434705	17.5635063	13.3237925	26	9.5134168	20.6225403	17.5635063	13.0017889
27	18.3374341	21.0263620	21.0263620	19.9191564	27	18.1159930	20.5518453	21.1212654	19.8875220

1 975					1 976				
US	Japan	Germany	France		US	Japan	Germany	France	
1	497.4358974	153.8461538	292.3076923	292.3076923	1	507.6923077	164.1025641	302.5641026	297.4358974
2	8.5166920	1.7261002	4.1729894	3.7746586	2	8.8581184	1.8019727	4.4006070	3.9264036
3	17.6753731	8.1679104	9.8917910	8.6119403	3	17.7014925	8.2201493	10.0485075	9.0037313
4	3.1590909	2.1755486	1.9326019	1.5250784	4	3.2335423	2.1677116	1.9757053	1.5799373
5	3.1617916	1.2833638	1.6718464	1.3290676	5	3.1663620	1.2833638	1.7084095	1.3702011
6	1.3182857	0.8091429	0.8194286	0.8777143	6	1.2977143	0.7817143	0.7920000	0.8571429
7	0.0524915	0.0819795	0.0576792	0.0621843	7	0.0496246	0.0767918	0.0601365	0.0601365
8	3.4486486	5.2540541	2.4540541	3.1027027	8	3.4054054	5.6432432	2.4864865	3.0810811
9	1.4045936	2.5653710	1.4045936	1.9611307	9	1.4045936	2.6819788	1.4257951	1.9505300
10	0.2941681	0.5102916	0.5222985	0.5379074	10	0.2797599	0.5066895	0.5246998	0.5150943
11	1.3234568	1.0582011	0.4712522	0.6659612	11	1.3629630	1.0920635	0.4768959	0.6687831
12	6.1937716	7.8892734	6.1245675	7.8892734	12	6.2975779	7.9584775	6.2975779	7.5432526
13	2.9489437	16.3732394	11.9718310	15.9771127	13	3.3450704	16.1091549	15.8450704	14.6126761
14	18.4362140	31.3580247	32.6748971	33.2510288	14	18.5185185	32.2633745	32.2633745	34.0740741
15	4.9448819	1.5275591	6.9606299	6.2204724	15	4.5826772	1.4645669	6.7244094	6.3622047
16	1.1652342	0.2617104	0.7228191	0.4299527	16	1.1652342	0.2866352	0.7352815	0.4424151
17	3.9087452	1.7642586	2.9125475	1.5361217	17	3.9771863	1.7946768	2.9353612	1.5741445
18	759.9243856	228.7334594	504.7258979	236.2948960	18	807.1833648	240.0756144	542.5330813	264.6502836
19	2.1403509	1.8245614	2.6140351	1.9766082	19	2.3274854	1.9473684	2.8479532	2.0877193
20	10.3571429	18.2142857	16.1607143	9.4196429	20	10.4910714	18.0357143	16.4285714	9.7321429
21	30.0538600	24.4524237	15.4039497	15.5116697	21	28.7612208	22.9443447	14.7576302	16.1579892
22	95.5000000	99.2500000	96.1666667	95.1666667	22	96.0000000	98.9166667	96.4166667	98.2500000
23	108.1867145	108.1867145	101.0233393	93.3572711	23	103.1597846	101.6517056	97.5044883	89.0843806
24	5.9676840	6.7037702	4.5852783	3.7773788	24	5.9676840	6.6499102	4.5493716	3.7773788
25	3.6050269	4.3806104	3.3321364	3.4326750	25	3.6624776	5.0700180	2.9587074	2.8294434
26	10.7477639	20.4615385	19.1735242	14.7728086	26	10.9624329	21.5348837	18.7978533	15.1484794
27	17.9894552	20.3936731	20.3936731	19.3497364	27	17.9894552	20.3620387	20.3620387	19.6977153

1 977					1 978				
US	Japan	Germany	France		US	Japan	Germany	France	
1	512.8205128	174.3589744	328.2051282	312.8205128	1	528.2051282	184.6153846	343.5897436	328.2051282
2	9.1236722	1.9916540	4.6471927	4.0212443	2	9.4271624	2.0864947	4.8558422	4.2109256
3	17.3880597	8.1940299	10.1007463	8.9253731	3	17.0485075	8.1940299	10.2052239	9.0820896
4	3.2296238	2.2108150	2.0148903	1.5760188	4	3.2217868	2.2264890	2.0893417	1.5956113
5	3.1663620	1.3519196	1.7312614	1.3519196	5	3.1480804	1.3930530	1.7906764	1.3930530
6	1.2668571	0.7834286	0.7902857	0.8571429	6	1.2480000	0.7731429	0.7954286	0.8588571
7	0.0492150	0.0826621	0.0582253	0.0646416	7	0.0473038	0.0657338	0.0567235	0.0677816
8	3.4162162	5.7297297	2.5729730	2.9945946	8	3.4918919	5.4918919	2.7243243	2.9945946
9	1.4681979	2.7561837	1.4893993	1.9558304	9	1.3886926	2.6713781	1.5795053	1.9611307
10	0.2833619	0.5222985	0.5018868	0.5150943	10	0.2761578	0.4118353	0.4406518	0.5475129
11	1.4024691	1.1033510	0.4994709	0.6603175	11	1.4617284	1.0779541	0.5079365	0.6631393
12	6.6435986	7.4394464	6.6435986	4.7750865	12	5.5363322	6.0207612	5.1557093	7.3010381
13	3.7411972	16.5492958	15.4489437	14.1725352	13	3.7411972	16.0211268	8.0545775	10.5633803
14	18.8477366	32.6748971	31.3580247	33.0041152	14	18.8477366	31.8518519	29.1358025	30.8641975
15	4.6614173	1.6220472	7.2598425	7.1338583	15	3.8740157	1.8897638	6.1259843	6.2992126
16	1.1652342	0.2990976	0.7477439	0.4673399	16	1.1652342	0.2990976	0.7477439	0.4984959
17	3.9543726	1.7946768	2.8517110	1.5285171	17	3.7794677	1.8250951	2.9125475	1.6197719
18	826.0869565	247.6370510	523.6294896	249.5274102	18	816.6351607	251.4177694	557.6559546	264.6502836
19	2.4678363	2.0000000	2.9181287	2.1754386	19	2.6023392	2.1695906	2.9415205	2.1988304
20	9.9553571	16.8750000	15.5357143	9.0625000	20	10.2232143	15.6250000	15.5357143	8.9732143
21	27.0377020	21.1131059	14.3267504	15.6193896	21	25.9605027	19.7127469	14.4344704	15.6193896
22	95.5000000	96.8333333	94.1666667	98.3333333	22	94.7500000	95.9166667	95.9166667	97.0833333
23	96.8761221	96.1220826	97.5044883	84.8114901	23	94.1113106	89.9640934	94.9910233	85.0628366
24	5.7163375	6.0754039	4.3877917	3.6157989	24	5.5906643	5.5906643	4.3339318	3.5619390
25	3.5906643	4.7684022	3.0879713	3.0161580	25	3.0305206	3.4614004	3.1166966	3.1166966
26	11.6601073	22.0178891	18.4758497	14.9338104	26	12.0357782	21.1592129	15.8998211	12.3577818
27	17.9894552	20.3936731	19.9191564	19.2864675	27	17.7363796	19.9507909	19.9507909	18.9068541

1 979					1 980				
US	Japan	Germany	France		US	Japan	Germany	France	
1	533.3333333	200.0000000	369.2307692	338.4615385	1	528.2051282	205.1282051	379.4871795	343.5897436
2	9.1426404	2.2003035	5.0265554	4.2867982	2	9.0288316	2.2192716	5.1213961	4.4575114
3	16.7089552	8.3768657	10.0223881	8.9776119	3	15.6119403	8.3507463	10.1791045	8.8208955
4	3.1982759	2.2578370	2.0344828	1.5760188	4	3.0415361	2.2578370	2.0658307	1.5250784
5	3.1160878	1.4387569	1.7769653	1.3747715	5	2.9744059	1.4387569	1.8500914	1.3382084
6	1.1931429	0.7525714	0.7937143	0.8571429	6	1.1794286	0.7354286	0.7885714	0.8897143
7	0.0565870	0.0792491	0.0574061	0.0679181	7	0.0657338	0.0904437	0.0640956	0.0698294
8	3.5243243	5.1891892	2.6486486	2.9189189	8	3.6540541	5.0054054	2.7351351	2.9081081
9	1.4045936	2.5759717	1.5742049	1.8816254	9	1.3091873	2.5038869	1.5477032	1.9081272
10	0.3361921	0.4886792	0.4586621	0.5739280	10	0.4202401	0.5859348	0.5066895	0.6207547
11	1.4843034	1.0666667	0.5164021	0.6659612	11	1.4250441	1.0102293	0.5079365	0.6659612
12	6.7474048	7.4048443	8.0276817	8.0276817	12	9.0311419	11.6608997	9.4463668	10.4844291
13	3.9612676	15.6690141	7.8785211	9.9911972	13	4.4014085	19.4982394	9.0228873	11.2235915
14	18.6008230	31.0288066	28.4773663	30.4526749	14	19.3415638	39.0123457	28.1481481	32.5102881
15	3.9370079	1.7795276	6.1732283	5.8425197	15	3.6220472	1.3228346	5.4330709	5.1811024
16	1.1652342	0.3302535	0.7664375	0.5171895	16	1.1839278	0.3115599	0.7664375	0.5171895
17	3.7262357	1.7490494	2.9201521	1.6197719	17	3.7034221	1.6349810	2.7224335	1.5969582
18	816.6351607	251.4177694	576.5595463	272.2117202	18	807.1833648	236.2948960	538.7523629	247.6370510
19	2.6198830	2.3333333	3.0935673	2.2456140	19	2.4678363	2.4152047	3.0935673	2.2280702
20	10.4017857	16.2946429	16.3392857	8.9732143	20	7.9017857	15.6250000	15.5803571	8.4375000
21	24.9910233	18.8509874	14.3267504	15.2962298	21	24.0215440	16.9120287	13.5727110	14.4344704
22	93.6666667	96.6666667	96.6666667	100.7500000	22	91.2500000	94.5000000	95.1666667	100.7500000
23	93.8599641	85.8168761	93.6086176	82.2980251	23	91.5978456	78.1508079	90.9694794	78.1508079
24	5.4111311	5.4649910	4.3339318	3.5439856	24	4.9263914	4.9263914	4.0646320	3.3105925
25	3.8635548	4.4811490	3.6050269	3.4901257	25	4.6535009	7.9712747	4.6391382	4.6391382
26	12.2504472	21.1055456	15.7388193	12.2504472	26	13.1091234	28.3506261	16.0608229	13.6994633
27	17.7363796	19.7293497	19.8875220	18.7170475	27	17.6731107	19.3497364	19.9507909	17.8945518

1 981					1 982				
US	Japan	Germany	France		US	Japan	Germany	France	
1	533.3333333	210.2564103	389.7435897	353.8461538	1	533.3333333	215.3846154	394.8717949	364.1025641
2	9.1047041	2.2572079	4.8368741	4.5713202	2	9.2943854	2.3141123	5.0265554	4.6092564
3	15.4552239	8.2985075	10.2052239	9.3694030	3	14.6194030	8.2985075	10.1268657	9.3955224
4	3.0141066	2.2147335	2.0775862	1.5877743	4	2.9435737	2.1794671	2.0932602	1.6269592
5	2.9332724	1.4067642	1.7815356	1.4067642	5	2.8601463	1.4250457	1.8135283	1.4296161
6	1.1605714	0.7200000	0.7628571	0.9017143	6	1.2017143	0.7045714	0.7782857	0.8845714
7	0.0650512	0.0882594	0.0722867	0.0739249	7	0.0549488	0.0922184	0.0672355	0.0759727
8	3.8162162	4.9945946	2.5945946	3.1675676	8	3.7945946	4.7675676	2.4540541	2.8540541
9	1.3303887	2.4434629	1.5053004	2.0724382	9	1.3727915	2.4752650	1.4575972	1.8339223
10	0.4250429	0.5811321	0.5463122	0.5259005	10	0.3782161	0.6123499	0.5283019	0.6339623
11	1.3940035	0.9312169	0.4966490	0.6490300	11	1.3770723	0.9114638	0.4881834	0.5756614
12	10.1384083	11.6608997	10.1384083	11.6608997	12	9.4463668	13.2871972	10.6920415	12.6643599
13	4.6654930	20.0704225	10.0792254	12.2799296	13	5.2376761	19.7623239	11.2676056	13.4242958
14	20.0823045	40.5761317	30.0411523	31.5226337	14	21.0699588	40.0823045	30.6995885	34.2386831
15	3.6220472	1.1968504	5.5905512	5.2283465	15	3.5275591	1.5118110	5.5905512	5.3070866
16	1.2462398	0.3240223	0.7664375	0.5171895	16	1.2773958	0.3240223	0.7913623	0.5421143
17	3.6806084	1.5741445	2.6387833	1.5437262	17	3.8098859	1.5817490	2.6007605	1.5589354
18	801.5122873	236.2948960	519.8487713	200.3780718	18	797.7315690	236.2948960	504.7258979	207.9395085
19	2.4853801	2.4327485	3.0058480	2.1988304	19	2.3333333	2.4444444	2.9005848	2.2046784
20	7.7678571	13.9285714	14.7767857	6.9642857	20	4.7767857	13.7500000	13.1250000	6.5178571
21	23.1597846	15.9425494	13.2495512	13.7881508	21	21.6517056	14.9730700	12.6032316	13.7881508
22	91.9166667	90.7500000	93.9166667	98.5833333	22	90.9166667	89.5833333	90.5000000	94.0000000
23	87.7019749	78.1508079	90.7181329	75.7630162	23	82.4236984	72.9982047	88.3303411	79.6588869
24	4.8007181	4.6570916	3.9210054	3.0771993	24	4.2621185	4.1723519	3.5978456	3.0951526
25	5.5008977	7.3824057	6.0610413	5.6732496	25	4.6965889	7.6265709	5.5008977	0.6319569
26	13.9677996	30.5509839	16.7048301	13.1627907	26	15.4168157	30.3899821	17.4025045	13.6994633
27	17.6098418	19.2548330	19.7926186	16.0281195	27	17.5149385	18.9068541	19.6977153	15.9964851

1 983					1 984				
US	Japan	Germany	France		US	Japan	Germany	France	
1	543.5897436	220.5128205	400.0000000	369.2307692	1	553.8461538	225.6410256	415.3846154	374.3589744
2	9.5030349	2.3330804	5.2541730	4.6471927	2	9.7116844	2.3520486	5.4628225	4.8179059
3	14.2276119	8.2201493	10.1268657	9.3955224	3	13.8358209	8.0895522	10.1268657	9.2388060
4	2.9004702	2.1755486	2.1089342	1.6152038	4	2.8416928	2.1285266	2.1285266	1.5916928
5	2.8327239	1.4113346	1.8500914	1.4159049	5	2.8235832	1.3747715	1.8546618	1.4067642
6	1.2000000	0.6942857	0.7817143	0.9017143	6	1.1502857	0.6702857	0.7714286	0.9051429
7	0.0496246	0.0827986	0.0636860	0.0741980	7	0.0452560	0.0770648	0.0631399	0.0732423
8	3.7081081	4.7135135	2.4324324	2.9189189	8	3.7837838	4.6054054	2.4432432	2.9513514
9	1.3886926	2.4752650	1.4628975	1.9558304	9	1.4310954	2.4275618	1.4734982	1.9293286
10	0.3493997	0.5463122	0.4922813	0.6231561	10	0.3265866	0.5018868	0.4886792	0.6171527
11	1.4109347	0.9058201	0.4853616	0.5671958	11	1.4306878	0.8804233	0.4797178	0.5784832
12	8.3044983	11.5224913	9.4463668	12.6643599	12	7.9584775	10.3806228	9.7923875	12.3529412
13	5.8538732	19.1901408	10.7394366	13.3802817	13	5.8098592	18.7500000	10.5633803	13.2042254
14	22.3868313	39.9176955	30.6172840	33.2510288	14	21.6460905	38.9300412	30.6172840	33.2510288
15	3.3070866	1.3858268	5.4488189	4.6456693	15	3.6220472	1.2598425	4.7874016	4.2992126
16	1.2524710	0.3427159	0.7913623	0.5857327	16	1.2524710	0.3614095	0.7913623	0.6106575
17	3.7186312	1.6501901	2.5931559	1.6958175	17	3.6501901	1.6501901	2.6159696	1.8098859
18	801.5122873	245.7466919	508.5066163	204.1587902	18	831.7580340	253.3081285	514.1776938	190.9262760
19	2.4269006	2.5204678	2.9415205	2.1695906	19	2.6081871	2.7894737	3.0526316	2.1520468
20	4.7767857	12.6785714	12.8125000	5.9375000	20	5.0000000	13.7500000	13.3482143	6.2053571
21	21.5439856	14.2190305	12.2800718	14.0035907	21	20.0359066	13.5727110	12.3877917	14.5421903
22	87.8333333	87.8333333	91.2500000	93.0000000	22	84.6666667	86.1666667	92.0833333	95.8333333
23	90.7181329	71.8671454	85.5655296	81.9210054	23	85.5655296	68.9766607	71.8671454	70.9874327
24	4.3698384	4.0287253	3.5080790	3.0053860	24	4.1903052	4.0107720	3.4362657	3.0412926
25	4.4236984	6.7791741	5.2710952	5.8743268	25	4.6247756	6.4631957	6.1615799	6.7935368
26	14.8264758	30.0143113	17.4025045	13.9677996	26	14.3971377	29.2093023	17.1878354	13.5384615
27	17.4833040	18.7486819	19.6028120	14.7943761	27	17.3884007	18.5588752	19.1282953	13.6555360

1 985					1 986				
US	Japan	Germany	France		US	Japan	Germany	France	
1	564.1025641	230.7692308	425.6410256	374.3589744	1	574.3589744	235.8974359	441.0256410	384.6153846
2	9.9203338	2.4279211	5.4438543	4.8368741	2	10.1479514	2.4468892	5.8611533	5.0265554
3	13.5746269	8.0111940	10.0746269	9.0559701	3	13.5746269	7.8544776	10.0223881	8.8992537
4	2.8103448	2.0932602	2.1285266	1.5721003	4	2.8221003	2.0815047	2.1324451	1.5485893
5	2.7367459	1.3747715	1.8729433	1.3793419	5	2.7504570	1.3884826	1.9049360	1.3884826
6	1.1400000	0.6514286	0.7491429	0.9017143	6	1.1485714	0.6548571	0.7662857	0.9017143
7	0.0429352	0.0721502	0.0632765	0.0724232	7	0.0322867	0.0623208	0.0464846	0.0574061
8	3.8918919	4.5405405	2.6054054	2.9621622	8	3.8702703	4.4756757	2.3351351	3.0270270
9	1.5000000	2.4646643	1.4310954	1.9346290	9	1.5424028	2.5282686	1.4363958	2.0565371
10	0.3169811	0.4658662	0.4886792	0.6171527	10	0.2365352	0.3938250	0.3602058	0.4778731
11	1.4278660	0.8550265	0.4797178	0.5671958	11	1.4194004	0.8578483	0.4797178	0.5897707
12	7.5432526	9.8615917	9.8615917	12.8027682	12	5.6747405	7.7854671	5.3979239	8.3044983
13	5.6338028	18.3538732	10.6073944	13.3802817	13	5.2816901	16.9454225	9.8591549	12.3679577
14	21.7283951	38.4362140	30.4526749	32.9218107	14	21.3991770	36.4609053	31.6872428	31.6872428
15	3.4173228	1.5433071	4.6614173	3.6692913	15	3.8740157	1.5433071	5.0708661	3.8582677
16	1.2587022	0.3177911	0.7913623	0.6480447	16	1.2587022	0.3302535	0.7913623	0.6480447
17	3.6045627	1.6197719	2.6768061	2.0076046	17	3.5437262	1.6349810	2.7072243	2.0456274
18	829.8676749	253.3081285	514.1776938	204.1587902	18	824.1965974	253.3081285	538.7523629	194.7069943
19	2.7426901	2.9122807	3.2046784	2.1520468	19	2.8245614	2.8625731	3.2865497	2.1345029
20	4.7321429	13.1696429	13.9285714	6.3392857	20	4.2410714	12.1875000	13.1250000	5.6696429
21	17.9892280	12.9263914	11.8491921	14.0035907	21	17.3429084	12.1723519	10.9874327	12.9263914
22	83.1666667	84.5833333	89.5000000	95.0000000	22	83.5000000	83.6666667	87.3333333	96.5000000
23	78.2764811	66.7145422	79.2818671	83.5547576	23	76.5170557	65.5834829	80.5385996	72.8725314
24	3.7414722	3.7414722	3.4003591	2.8078995	24	3.6696589	3.5619390	3.1849192	2.5745063
25	3.9497307	6.2764811	5.9030521	6.1615799	25	2.0682226	3.7917415	2.6283662	3.2746858
26	14.5044723	28.8872987	17.4025045	13.0554562	26	13.9141324	26.9552773	17.9391771	12.0357782
27	17.3567663	18.1159930	18.5272408	13.1493849	27	17.3567663	18.0210896	18.5588752	12.2952548

1 987					1 988				
US	Japan	Germany	France		US	Japan	Germany	France	
1	584.6153846	241.0256410	456.4102564	389.7435897	1	589.7435897	251.2820513	466.6666667	394.8717949
2	10.5273141	2.4658574	6.2594841	5.1403642	2	11.0773900	2.6555387	6.6009105	5.3110774
3	13.0261194	7.9850746	9.8656716	8.7947761	3	12.5820896	7.6194030	9.7873134	8.6902985
4	2.7319749	2.1050157	2.1520376	1.5368339	4	2.6614420	2.1010972	2.1520376	1.5329154
5	2.6590494	1.3976234	1.9277879	1.3656307	5	2.6316271	1.3336380	1.9186472	1.3519196
6	1.1537143	0.6428571	0.7800000	0.9034286	6	1.1657143	0.6342857	0.7834286	0.9085714
7	0.0303754	0.0613652	0.0441638	0.0560410	7	0.0281911	0.0586348	0.0418430	0.0538567
8	3.8702703	4.4756757	2.2810811	2.9945946	8	3.7945946	4.3567568	2.2486486	2.9405405
9	1.5106007	2.5335689	1.4045936	2.0671378	9	1.4893993	2.4964664	1.3939929	2.0883392
10	0.2305317	0.3445969	0.3373928	0.4598628	10	0.2197256	0.3181818	0.3181818	0.4226415
11	1.4278660	0.8663139	0.4768959	0.6095238	11	1.3996473	0.8634921	0.4627866	0.6490300
12	5.7093426	5.9861592	4.6712803	7.8200692	12	5.5363322	4.9134948	4.0484429	7.1972318
13	4.8415493	15.8010563	7.0422535	9.9911972	13	4.6214789	15.1848592	6.6021127	9.4630282
14	20.4115226	34.5679012	31.8518519	30.2880658	14	19.5884774	33.6625514	32.4279835	30.0411523
15	3.7795276	1.8582677	4.4881890	3.5118110	15	3.3543307	1.7952756	5.5433071	4.1574803
16	1.2587022	0.3551783	0.7913623	0.6605071	16	1.2836270	0.3738719	0.7726687	0.6605071
17	3.5741445	1.6577947	2.6387833	2.0076046	17	3.5969582	1.6577947	2.5171103	1.9771863
18	839.3194707	253.3081285	514.1776938	175.8034026	18	869.5652174	279.7731569	497.1644612	162.5708885
19	3.0000000	2.9415205	3.2865497	2.1345029	19	3.2339181	3.2046784	3.4269006	2.2222222
20	4.0625000	12.1875000	12.8125000	5.3571429	20	4.2857143	13.2589286	13.3928571	5.7589286
21	17.2351885	12.3877917	10.9874327	12.2800718	21	17.0197487	11.9569120	10.8797127	12.6032316
22	83.9166667	83.9166667	86.4166667	96.6666667	22	82.9166667	83.6666667	88.5833333	99.3333333
23	75.2603232	65.9605027	80.5385996	75.1346499	23	74.6319569	64.3267504	77.2710952	69.3536804
24	3.7235189	3.6157989	3.1490126	2.5206463	24	3.7953321	3.6337522	3.1490126	2.5206463
25	2.5278276	2.8438061	2.8438061	3.0592460	25	1.8815081	2.8007181	2.1256732	2.1256732
26	12.8407871	24.8085868	18.5295170	11.3381038	26	12.0357782	23.6279070	18.2611807	11.2844365
27	17.3567663	17.8629174	18.2108963	12.0105448	27	17.2302285	18.1159930	17.8629174	11.7891037

1 989					1 990				
US	Japan	Germany	France		US	Japan	Germany	France	
1	589.7435897	266.6666667	482.0512821	405.1282051	1	589.7435897	282.0512821	487.1794872	410.2564103
2	11.3239757	2.8072838	6.6388467	5.4628225	2	11.6654021	3.0159332	6.8095599	5.6145675
3	12.2425373	7.5410448	9.6305970	8.6641791	3	11.9291045	7.4888060	9.5522388	8.4552239
4	2.6222571	2.0658307	2.1324451	1.5211599	4	2.5556426	2.1010972	2.1010972	1.4819749
5	2.5722121	1.4021938	1.9323583	1.3564899	5	2.5173675	1.4204753	1.9003656	1.3382084
6	1.1691429	0.6325714	0.7782857	0.9017143	6	1.1794286	0.6342857	0.7748571	0.8982857
7	0.0286007	0.0576792	0.0474403	0.0539932	7	0.0296928	0.0598635	0.0483959	0.0520819
8	3.7513514	4.1945946	2.0756757	2.9945946	8	3.5783784	4.1729730	2.0756757	3.0270270
9	1.5371025	2.4381625	1.3091873	2.1413428	9	1.4734982	2.3692580	1.3303887	2.3056537
10	0.2293310	0.4226415	0.3301887	0.4226415	10	0.2497427	0.3193825	0.3385935	0.4082333
11	1.3911817	0.8550265	0.4712522	0.6716049	11	1.3573192	0.8409171	0.4825397	0.6885362
12	5.7439446	4.7404844	5.2941176	7.8892734	12	6.2975779	5.8131488	5.6401384	7.9584775
13	4.5334507	16.1971831	6.7341549	9.2429577	13	4.5774648	15.8010563	7.2183099	8.9348592
14	18.5185185	32.0164609	32.0164609	29.0534979	14	18.1069959	31.2757202	31.2757202	29.5473251
15	3.1181102	2.3149606	4.9448819	4.1889764	15	3.9842520	2.3149606	5.2755906	4.0314961
16	1.2836270	0.4112591	0.7726687	0.6854319	16	1.3085518	0.4174903	0.7477439	0.6854319
17	3.5969582	1.6425856	2.3650190	2.0076046	17	3.5741445	1.7262357	2.2433460	1.9771863
18	869.5652174	285.4442344	463.1379962	170.1323251	18	852.5519849	308.1285444	457.4669187	158.7901701
19	3.2690058	3.3918129	3.5438596	2.3216374	19	3.2573099	3.5321637	3.6374269	2.3391813
20	4.1964286	13.2589286	13.2589286	5.7142857	20	4.4642857	13.2589286	11.5625000	5.3571429
21	16.9120287	11.6337522	10.5565530	11.9569120	21	16.8043088	11.3105925	10.0179533	12.0646320
22	81.6666667	82.6666667	87.5833333	97.1666667	22	83.6666667	82.0833333	87.2500000	96.6666667
23	73.8779174	63.4470377	75.7630162	68.4739677	23	70.4847397	62.5673250	71.2387792	67.0915619
24	3.7235189	3.5260323	3.2028725	2.4308797	24	3.6157989	3.4003591	2.8617594	2.3590664
25	1.9820467	2.7001795	2.4129264	2.3985637	25	2.1974865	2.9443447	2.3554758	2.3554758
26	11.3917710	22.2325581	17.8855098	11.0161002	26	10.8550984	21.3202147	17.3488372	11.2307692
27	17.1353251	18.1476274	17.5465729	11.7891037	27	16.9455185	18.0843585	17.7047452	11.5043937

	1 991			
	US	Japan	Germany	France
1	584.6153846	297.4358974	487.1794872	415.3846154
2	11.6464340	3.1676783	6.8285281	5.6904401
3	11.6940299	7.4104478	9.4477612	8.3507463
4	2.5321317	2.1402821	2.1324451	1.4584639
5	2.4716636	1.4204753	1.8683729	1.3199269
6	1.1880000	0.6394286	0.7371429	0.9102857
7	0.0273720	0.0620478	0.0520819	0.0493515
8	3.3729730	4.2810811	2.3135135	3.0810811
9	1.3992933	2.4381625	1.5053004	2.3533569
10	0.2305317	0.3169811	0.3590051	0.3914237
11	1.3291005	0.8465608	0.4938272	0.7111111
12	5.6747405	6.3667820	5.8823529	8.2006920
13	4.4454225	15.4929577	7.7464789	8.7588028
14	17.5308642	30.4526749	30.4526749	28.0658436
15	3.5118110	2.2992126	4.4409449	3.3070866
16	1.3210142	0.4486463	0.7477439	0.7415127
17	3.6273764	1.7262357	2.2965779	2.1292776
18	841.2098299	313.7996219	483.9319471	200.3780718
19	3.2046784	3.6081871	3.7309942	2.3216374
20	2.8571429	12.7232143	10.5803571	5.2232143
21	16.6965889	11.3105925	9.8025135	12.1723519
22	84.7500000	81.8333333	86.8333333	95.5000000
23	68.5996409	61.4362657	70.4847397	66.9658887
24	3.5439856	3.2387792	2.7360862	2.3590664
25	1.6086176	3.4183124	2.0394973	2.2692998
26	10.5867621	21.0518784	16.7584973	10.9624329
27	16.6608084	17.7363796	17.7363796	11.6942004



## **8 Annexe B : Données Chapitre 5**

		Filière	Charbon	pétrole	Filière gaz naturel	Filière nucléaire	Cellules en silicium polycristallin	Microcentrale	Centrale au fil de l'eau	Centrale avec réservoir	Filière éolienne	Filière géothermie
			CHAR	PETR	GAZ	NUCL	PHOT	HMIC	HFIL	HRES	EOLE	GEOT
Rendement exergetique a)		REND	12	11	13	35	10	90	85	93	45	10
Renouvelabilité b)	1/année	RENO	0.005	0.017	0.013	0.010	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Production à la demande c)		DEMA	8	9	9	6	1	5	5	10	1	6
Accroissement d)	Energie	ACCR	4	5	6	5	8	1	1	1	4	4
Prix e)	€/MWh	PRIX	48.62	100.16	57.20	90.09	200.20	80.08	90.09	60.00	90.09	35.81
CO2 f)	g/kWh	CO2	1300	1110	460	5.19	53	2.88	2.88	3.67	9.56	50
COV g)	g/kWh	COV	0.168	0.5	0.19	0.00773	0.046	0.00461	0.00461	0.00398	0.0085	0.02255
NOx h)	g/kWh	NOX	3.28	1.3	0.56	0.0339	0.24	0.0315	0.0315	0.0262	0.0386	0.0386
SO2 i)	g/kWh	SO2	5.39	3	0.13	0.0225	0.16	0.00398	0.00398	0.0043	0.0383	0.16
Particules <2.5 m j)	g/kWh	PART	0.297	0.14	0.012	0.0054	0.02	0.0176	0.0176	0.012	0.0117	0.0117
DBO dans eau k)	g/kWh	DBO	0.289	4.6	3.4	0.0135	0.2	0.00819	0.00819	0.00689	0.0379	0.0135
Cd dans sol l)	ng/kWh	CD	26.8	37	4.4	20.2	27	2.03	2.03	2.35	5.61	4.4
Radon dans air m)	kBq/kWh	RADO	0	0	0	727	0	0	0	0	0	0
Bien publique n)		BIPU	1	1	1	1	5	5	5	5	10	5
Occupation des sols o)	m2/an/kWh	OCCU	0.0222	0.0025	0.00041	0.00577	0.004	0.00464	0.00464	0.00369	0.00118	0.00118
Temps de retour énergétique p)		TRET	2	2	2	2	8	2.5	2.5	2.5	0.25	2.5
Utilisation de main d'œuvre q)		UMAI	10	10	10	5	1	1	5	5	1	5
Production local r)		PLOC	5	1	5	1	10	10	10	10	10	10

### **Notes sur les données :**

- a) Voir rapport Scane (2003)
- b) Voir Sarlos et al. (2003), pp 164, pp 177, pp 202 et pp 237 ; Rousseaux et Apostol (2001), pp 62, pp 67, pp 73 et pp79 ; Lombord (2004) pp 66
- c) Note de 1 à 10. base de réflexion Sarlos et al. (2003) pp 870
- d) Note de 1 à 10, base données Swisselectricity, Sarlos et al. (2003) et ; Rousseaux et Apostol (2000)
- e) Prix obtenus sur base données Swisselectricity
- f) Voir Dones et al. (2004)
- g) Voir Dones et al. (2004)
- h) Voir Dones et al. (2004)
- i) Voir Dones et al. (2004)
- j) Voir Dones et al. (2004)
- k) Voir Dones et al. (2004)
- l) Voir Dones et al. (2004)
- m) Voir Dones et al. (2004)
- n) Note de 1 à 10 Estimation par l'auteur
- o) Voir Dones et al. (2004)
- p) Voir Sarlos et al. (2003) pp 671
- q) Note de 1 à 10 Estimation par l'auteur
- r) Note de 1 à 10 Estimation par l'auteur



## 9 Bibliographie

- Albouy, Y., (1983), *Marginal Cost Analysis and Pricing of Water and Electric Power*, Inter-American Development Bank, Washington.
- Albouy, Y., (1984), *Pratique des coûts marginaux de réseaux électriques*, Rapport final du projet GAS 651, Banque mondiale, Washington.
- Allen, K., (1999), *DEA in the ecological context – An overview*, in the Private and Public Service Sector G. Westermann (Ed.) Gabler, Wiesbaden, pp. 203-235.
- Antille, G., (2001), *Analyse de la composante chronologique dans les tableaux croisés: une approche descriptive*, Revue suisse d'économie et de statistique, vol 137, n°3, Basel, pp. 241-253.
- Araujo, Baddour, J., Boussemart, J.-Ph., Olivier, A. et Payet, J., (1997), *Modélisation de la demande d'énergie de l'île de La Réunion, étude réalisée pour l'EDF - Réunion*, Université de La Réunion, Saint Denis.
- Ayres, R.U., (1996), *Eco-thermodynamics : Economics and the Second Law*, Working Paper, INSEAD, n°96/51/EPS, Fontainebleau, France.
- Ayres, R.U. et Martinas, K., (1995), *Waste Potential Entropy : The Ultimate Ecotoxic*, Economie appliquée, tome XLVIII; n°2, Paris, pp. 95 -120.
- Ayres, R.U. et Martinas, K., (1996), *Eco-Thermodynamics : Exergy and Life Cycle Analysis*, Working Paper INSEAD's, Fontainebleau, France.
- Babusiaux, D., (1990), *Décision d'Investissement et Calcul Economique dans l'Entreprise*, Economica, Paris.
- Badillonet, P., (1999), *La Méthode DEA, Analyse des Performances*, Hermes Science Publications, Paris.
- Balescu, R., (1990), *Irréversibilité*, Encyclopoedia Universalis, Vol. 12, Paris, pp. 638-639.
- Bana, C.A., Costa, E. et Vansnick, J.C., (2000), *Cardinal value measurement with MACBETH*, in Zanakis S. H., Doukidis G. and Zopounidis C. (eds.), *Decision Making: Recent Developments and Worldwide Applications*, London, pp. 317-329.

- Ben Mena, S., (2000), *Introduction aux méthodes multicritères d'aide à la décision*, Biotechnol. Agron. Soc. Environ, 4 (2), Hamilton, pp. 83-93.
- Berry, R., Salamon, P. et Heal, G.M., (1978), *On a Relation between Economic and Thermodynamic Optima*, Resources and Energy, n°1, pp. 125-137.
- Birembaut, A., (1990), *Histoire de la thermodynamique*, Encyclopoedia Universalis, vol. 22, pp. 537-541.
- Borel, L., Morf J. Sarlos, G. et Suter, P., (1981), *Projets d'Ecole Energie*, Rapport final, EPFL, Lausanne.
- Borel, L., (1988), *Thermodynamique, énergétique et mutation dans l'évolution du vivant, leçon terminale du Professeur Lucien Borel du 28 avril 1988*, Presses polytechniques romandes, EPFL, Lausanne.
- Borel, L., (1991), *Thermodynamique et énergétique, Vol I, 3e édition revue et corrigée*, Presses polytechniques romandes, Lausanne.
- Bouyssou, D. et Perny, P., (1997), *Aide multicritère à la décision et théorie du choix social*, Nouvelles de la Science et des Technologies, n°15, pp. 61-72.
- Boussmart, J. et Dervaux, B., (1994), *Diagnostic de l'efficacité productive par la méthode DEA*, Technologies, n°31, pp. 44-45.
- Bruggink, J., (1985), *The Theory of Economic Growth and Thermodynamical Laws*, in Van Gool, W. & Bruggink, (eds.) *Energy and Time in the Economic and Physical Sciences*, Amsterdam.
- Carlevaro, F., (1994), *Décomposition d'agrégats au moyen d'indicateurs : Une méthode économétrique*, Revue suisse d'Economie politique et de Statistique, n° 130 (3).
- Carlevaro, F. et Bertholet, J.-L., (2000), *Aggregating Time Unbalanced Panel Observations. Methodology and Application to Oil Consumption of Boiler Rooms*, in *Panel Data Econometrics : Future Directions*, Krishnakumar, J. and Ronchetti, E. (eds).
- Carlevaro, F. et Bertholet, J.-L., (1998), *Indices de consommation électrique pour les services généraux d'immeuble et évaluation de gisements de négawatts*, Revue suisse d'Economie politique et de Statistique, Vol. 134 (4).

- Carlevaro, F., Garbely, M. et Genoud, S., (2002), *Evaluation comparée de méthodes de contrôle et de décision en matière de développement durable: Rapport Final du projet OFEN N°78207*, Centre universitaire d'étude des problèmes de l'énergie, Genève.
- Carlevaro, F., Garbely, M. et Genoud, S., (2003), *Comparing and Assessing Control and Decision Methods for Sustainable Development*, Environmental research, engineering and management, 2003.No.4(26), P.62-67.
- Charnes, A., Cooper W.W. et Rhodes, E., (1978), *Measuring the efficiency of decision making units*, European Journal of Operational Research, vol. 2, n°1, pp. 429-444.
- Cleveland, C.J. et Ruth M., (1997), *When, where and by how much do biophysical limits constrain the economic process ? A survey of Nicholas Georgescu-Roegen's contribution to ecological economics*, Ecological economics, vol.22, n°3, pp. 203-223.
- Condorcet, A., (1786), *Essai d'application de l'analyse à la probabilité de décisions prises à la pluralité des voix*, Chelsea Publishing Cy.
- Consonnil, A. et Lesourd, J.B., (1986), *Industrial Accounting and Control Systems : A Survey*, Energy Conversion and Management, n°26, pp. 357- 361.
- Daly, E., (1992), *Is the Entropy Law Relevant to Economics of Natural Resources Scarcity ? Yes of Course it is*, J. of Environmental Economics and Management, n° 23, pp. 91-95.
- Dasgupta, P. et Heal, G.M., (1979), *Economic Theory and Exhaustible Resources*, Cambridge University Press, Cambridge.
- De Montbrial, T., (1976), *Thermodynamique et Économie*, dans : Sadi Carnot et l'essor de la thermodynamique, Éditions du C.N.R.S., Paris, pp. 321-333.
- Dones R. (Ed.), Bauer C., Bolliger R., Burger B., Faist Emmenegger M., Frischknecht R., Heck T., Jungbluth N. et Röder A., (2004), *Life Cycle Inventories of Energy Systems: Results for Current Systems in Switzerland and other UCTE Countries. Final report ecoinvent 2000 No. 5*, Villigen: Paul Scherrer Institut, and Dübendorf, Switzerland: Swiss Centre for Life Cycle Inventories.
- Dones R, Heck T., Faist Emmenegger M. and Jungbluth N., 2005, *Life Cycle Inventories for the Nuclear and Natural Gas Energy Systems, and Examples of Uncertainty Analysis*, International Journal of Life Cycle Analysis, 10 (1), pp. 10-23.

- Drapkin, R., (1981), *Energy Analysis of Major Household Appliances*, Ontario Hydro, Toronto.
- Dyckhoff, H. et Allen, K., (2001), *Measuring ecological efficiency with data envelopment analysis (DEA)*, *European Journal of Operational Research*, 132, pp. 312-325.
- Dyke, C., (1994), *From Entropy to Economy : A Thorny Path*, in Burlet P. & Foster J., *Economics and Thermodynamics : New Perspectives on Economic Analysis*, Kluwer Academic Publishers, London.
- Energy Information Administration, (1995), *Electricity Generation and Environmental Externalities: Case Studies*, U.S. Department of Energy, Washington, DC 20585.
- Ertesvåg I. S., (2001), *Society Exergy Analysis: A comparison of Different Societies*, *Energy*, Vol. 26, pp. 253-270.
- European Commission, (2001), *New research reveals the real costs of electricity in Europe*, European Commission, Brussels.
- Faber, M., (1985), *A Biophysical Approach to The Economy Entropy, Environment and Ressources*, in Van Gool, W. & Bruggink J. (eds.) *Energy and Time in the Economic and Physical Sciences*, North Holland, Amsterdam.
- Faber, M., Niemes, H. et Stephan, G., (1987), *Entropy, Environment and Resources*, Springer-Verlag, Berlin.
- Färe, R., Grosskopf, S. et Lovell, C.A.K., (1985), *The Measurement of Efficiency of Production*, Kluwer Nijhof Publishing.
- Färe, R., Grosskopf, S. et Lovell, C.A.K., (1994), *Production Frontiers*, Cambridge University Press, Cambridge.
- Faucheux, S., Froger, G. et Munda, G., (1994), *Des Outils d'Aide à la Décision pour la Multidimensionnalité Systémique : Une Application au Développement Soutenable*, *Revue Internationale de Systémique*, Vol: 8, N°4-5, Paris.
- Faucheux, S. et Noël, J.-P., (1995), *Economie des Ressources Naturelles et de l'Environnement*, Armand Colin, Paris.
- Faucheux, S. et O'Connor, M., (1998), *Valuation for Sustainable Development. Methods and Policy Indicator*, Edward Elgar Publisher (UK), Cheltenham.

- Ferrari, S. et Lesourd, J.B., (2000), *Efficacité productive, substitutions factorielles et développement durable*, Communication, Colloque SESAME, Dijon.
- Ferrari, S., Genoud, S. et Lesourd, J.B., (2001), *Thermodynamics and economics : Towards exergy-based indicators of sustainable development*, Revue suisse d'économie et de statistique, vol 137, n°3, Basel.
- Gallopín, G.C., (1997), *Indicators and their Use : Information for Decision-making*, in Moldan, B., Billharz S. and Maltravers R. (eds), *Sustainability Indicators : A report on the Project on indicator of Sustainability Development*, Scope 58, John Wiley & son, New-York.
- Gazerian, J., Lesourd, J.B., Ruiz, J.M. et Sanfeld, A., (1991), *Engineering Foundations of Production Microeconomics. The Case of the Chemical Processing Industries*, International Journal of Production Economics, n°22, pp. 163-168.
- Gibbs, J.W., (1902), *Elementary principles in statistical mechanics*, Charles Scribner's sons, New-York.
- Genoud, S., (2000), *Le deuxième principe de thermodynamique et l'économie*, Travail de diplôme post-grade en énergie EPFL, Centre universitaire d'étude des problèmes de l'énergie, Genève.
- Genoud, S., (1998), *Comptabilité énergétique pour un développement durable*, Communication, Second International Conference of the European Society for Ecological Economics, Université de Genève, Genève.
- Genoud, S. et Lesourd, J.B., (2009), *Characterization of sustainable development indicators for various power generation technologies*, International Journal of Green Energy, Taylor & Francis, Tampa, Volume 6, Issue 3, 2009, pp. 257-267.
- Georgescu-Roegen, N., (1967), *Analytical Economic : Issues and Problems*, Harvard University Press, Cambridge.
- Georgescu-Roegen, N., (1971), *The entropy law and the economic process*, Harvard University press, Cambridge.
- Georgescu-Roegen, N., (1976), *Energy and Economic Myths : Institutional and Analytical Economic Essays*, Pergamon cp. NY.

- Georgescu-Roegen, N., (1979), *Energy analysis and economic valuation*, Southern Economic Journal, XLIV, pp. 1023-1058.
- Germain, M., (1989), *Le principe de conservation de la matière dans le cadre du modèle d'Harrod-Domar*, Working Paper N°9006, Université Catholique de Louvain, Louvain.
- Grosclaude, P., (1995), *Comptabilité Nationale et Environnement : Des Limites de l'Intégration Comptable à la Construction d'Indices Environnementaux*, Université de Neuchâtel : Faculté de Droit et des Sciences Economiques, Thèse, Neuchâtel.
- Grubbström, R.W., (1984), *Toward a Theoretical Basis for Energy Economics*, Pergamon Press, New-York.
- Heck T., Faist Emmenegger, M. et Jungbluth N., (2005), *Life Cycle Inventories for the Nuclear and Natural Gas Energy Systems, and Examples of Uncertainty Analysis*, International Journal of Life Cycle Analysis 10 (1), pp. 10-23.
- HELIO, (1997), *Is energy contributing to sustainable development ?*, Publication interne, Paris.
- Hokkanen, J. et Salminen, P., (1997), *Electre III and IV Decision Aids in an Environmental Problem*, Journal of Multi-criteria Decision Analysis, vol. 6, pp. 215-226.
- IFEN, (1999), *Les Indicateur de Développement Durable*, Institut Français de l'Environnement, Collection d'Etudes et Travaux n°24, Orléans.
- International Energy Agency, (2005), *Projected Costs of Generating Electricity*, OECD, Paris.
- Islam, S., (1985), *Effect of an essential input on isoquants and substitution elasticities*, Energy Economics, n°7, pp. 194-196.
- Jacques, J.K., Lesourd, J.B. et Ruiz, J.M., (eds) (1988), *Modern Applied Energy Conservation. New Directions in Energy Conservation Management.*, Ellis Horwood, Halsted Press, John Wiley, Chichester, New-York, p. 405.
- Kelvin, W., (1852), *On a Universal Tendency in Nature to the Dissipation of Mechanical Energy*, Proceedings of the Royal Society of Edinburgh, Edinburgh.
- Korhonen, P. et Luptacik, M., (2000), *Eco-efficiency Analysis of Power Plants: An Extension of Data Envelopment Analysis*, Working Paper W-241 Helsinki School of Economics and Business Administration, Helsinki.

- Krelle, W., (1984), *Economic growth with exhaustible resources and environmental protection.*, Zeitschrift für die Gesamte Staatswissenschaft , n °140, pp. 399-429.
- Kummel, R., Lindenberger, D. et Eichhorn,W., (2000), *The productive power of energy and economic evolution*, Indian Journal of Applied Economics, Special Issue on Macro and Micro Economics, Würzburg.
- Le Goff, P., (1990), *Optimisation énergétique et économie comparées de systèmes industriels*, Entropie, n°153/154, pp. 136-146.
- Lesourd, J.B., (1981), *L'énergie et les substitutions entre facteurs de production : Etude théorique et vérification empirique sur des exemples tirés de l'économie français*, Atelier national de reproduction des thèses, Université de Lille III, Lille.
- Lesourd, J.B., (1985), *Energy and Resources as Production Factors in Process Industries*, Energy Economics, n°7, pp. 138-144.
- Lesourd, J.B., (1990), *Modélisation économique de la production d'énergie électrique : fondement physique et économique. Application à la tarification de l'électricité et à la comptabilité d'énergie*, Entropie, pp. 131-135.
- Lesourd, J.B., (2001), *Solar Photovoltaic Systems: the economics of a renewable energy resource*, Environmental Modelling and Software, 16 (2), pp. 147-156.
- Lesourd, J.B. et Gousty, Y., (1981), *Bases économiques et thermodynamiques des techniques de comptabilité de l'énergie*, Revue d'Economie Industrielle, n° 15, pp. 44-59.
- Lesourd, J.B. et Hallegatte, R., (1986), *Le concept de fonction de production de procédé*, Entropie, n°128, pp. 25-33.
- Lesourd, J.B. et Sanfeld, A., (1989), *Production Function of a Simple Model Internal Combustion Engine*, International Journal of Energy Research, n°13, pp. 123-125.
- Lesourd, J.B. et Park, S.U., (2005), *The economics of grid-connected electricity production from solar-photovoltaic systems*, Communication, Annual Meeting of the Swiss Society of Economics and Statistics Swiss Federal Institute of Technology of Zurich, Zurich.
- Lesourd, J.B. et Schilizzi, S., (2003), *The Environment in Corporate Management. New Directions and Economic Insights*, Foreword by D. Pearce University of London.

- Lomborg, B., (2004), *L'Ecologiste sceptique: le véritable état de la planète*, Le Cherche-Midi, Paris.
- Lotka, A., (1997), *Contribution to Energetics of Evolution*, Proceeding of the National Academy of the Sciences of the United States of America, Genève.
- Mahlberg, B. et Obersteiner, M., (2001), *Remeasuring the HDI by Data Envelopment Analysis*, Interim Report IR-01-069 International Institute for Applied Systems Analysis, Laxenburg.
- Månsson, B.A.G., (1986), *Optimal Development with Flow-Based Production*, Resources and Energy, n°8, pp. 109-131.
- Maystre, L., Pictet Y. et Simos, J., (1994), *Méthodes Multicritères ELECTRE*, Presses polytechniques romandes, Lausanne.
- De Montbrial, T., (1976), *Thermodynamique et Economie*, in Sadi Carnot et l'essor de la thermodynamique. Editions du C.N.R.S., Paris.
- Moore, J.L., (1995), *Cost-Benefit Analysis: Issues in Its Use in Regulation*, National Council for Science and Environment, Washington.
- O'Connor, M., (1991), *Entropy, Structure and Organisation Change*, Ecological Economics, n°3, pp. 95-122.
- OCDE, (1985), *Environmental effects of electricity generation*, OECD, Paris.
- OCDE, (1993), *Corps Central d'Indicateurs de l'OCDE pour les Examens des Performances Environnementales*, Monographies sur l'Environnement, OCDE, n°81(179), Paris.
- OCDE, (2002), *Aggregated Environmental Indices: Review of Aggregation Methodologies in Use*, OCDE, Paris.
- OFEFP, (1998), *Protection de la nature: beaucoup d'efforts et d'effets? Suivi et monitoring: les instruments de base pour contrôler l'efficacité. Une vue d'ensemble*, Bulletin <http://www.buwal.ch/bulletin/1998/f4a02s01.htm>, n° 4, pp. 1-4.
- OFEN, (1995), *Pour le bon usage de la chaleur de l'environnement*, Office fédéral des questions conjoncturelles, n°724.260.f, Berne.
- OCDE/JRC, (2005), *Handbook on Constructing Composite Indicators: Methodology and User Guide*, OECD Statistics Working Paper, Paris.

- OFS & OFEFP, (1999), *Le Développement Durable en Suisse : Eléments pour un Système d'Indicateur*, Statistique de la Suisse, Office fédéral de la statistique.
- Park, S.U. et Lesourd, J.B., (1999), *The efficiency of conventional fuel power plants in South Korea. A comparison of parametric and non-parametric approaches*, International Journal of Production Economics, n°63 (1).
- Pasquier, J.-L., (1997), *Analyse éco-énergétique, entre approche écologico-économique et physico-économique*, Centre universitaire d'étude des problèmes de l'énergie, Genève.
- Passet, R., (1979), *L'Économie et le vivant*, Payot, Paris.
- Pearce, D.W. et Turner, R.K., (1990), *Economics of Natural Resources and the Environment*, Harvester Wheatsheaf, London.
- Perrings, C., (1986), *Conservation of Mass and Instability in a Dynamic Economy-Environment System*, Journal of Environmental Economics and Management, n°13, pp. 199-211.
- Pigou, A.C., (1935), *The Economics of Stationary States*, Macmillan, London, pp. 409-435.
- Pillet, G. et Odum, H.T., (1984), *Energy Externality and the Economy of Switzerland*, Revue suisse d'économie politique et de statistique, vol.120, n°3.
- Pillet, G. et Odum, H.T., (1987), *Energie, écologie, économie*, Georg Editeur, Genève.
- PNUD, (2000), *L'Energie après Rio - Perspectives et Défis*, Nations Unies, New-York.
- Prigogine, I. et Stengers, I., (1986), *La Nouvelle Alliance*, Gallimard, Paris.
- Proops, J., (1985), *Thermodynamics and Economics : From Analogy to physical Functioning*, Van Gool, W. & Bruggink, J. (eds), Energy and Time in the Economics and Physical Sciences, Amsterdam.
- Reistad, G.M., (1975), *Available Energy Conversion and Utilization in the United States*, J.Eng. Power 97, n°429.
- Rosen, M.A., (1992), *Evaluation of Energy Utilisation Efficiency in Canada Using Energy and Exergy Analyses*, Energy, Vol 17, n°4, pp. 339-350.
- Rousseaux, P. et Apostol, T., (2000), *Valeur Environnementale de l'Energie*, Presses polytechniques et Universitaires Romandes, Lausanne.

- Roy, B., (1985), *Méthodologie Multicritère d'Aide à la Décision*, Economica, Coll. "gestion", Paris.
- Sarlos, G., Haldi, P. et Verstraete, P., (2003), *Systèmes Energétiques, Offre et demande de l'énergie : méthodes d'analyse*, Presses Polytechnique et Universitaires Romande, Lausanne.
- Scane (2003), *Approche Exergétique : Annexe à la directive relative au justificatif du concept énergétique*, Service Cantonal de l'Energie, Genève.
- Schaeffer, R. et Wirtshafter, R., (1992), *An Exergy Analysis of the Brazilian Economy : From Energy Products to the Final Use*, Energy, Vol.17, pp. 841-855.
- Schempri, P., (1993), *Approche entropique dans le prolongement de la théorie néo-autrichienne du capital*, Cahier du C3E, n°93-5.
- Schneider, D., (1994), *Modélisation de la démarche du décideur politique dans la perspective de l'intelligence artificielle*, Université de Genève, Faculté des Sciences Economiques et Sociales, Dpt de science politique, Thèse, Genève.
- Shephard, R.W., (1970), *Theory of Cost and production Functions*, Princeton: Princeton University Press.
- Smith, C.B., (1976), *Efficient Electricity Use*, Pergamon Press, New-York.
- Stern, D.I., (1997), *Limits to substitution and irreversibility in production and consumption : A neoclassical interpretation of ecological economics*, Ecological Economics, n° 21, pp. 197-215.
- Thiry, B. et Tulkens, H., (1989), *Productivité, efficacité et progrès technique. Notions et mesures dans l'analyse économique*. dans: Efficacité et Management, Tulkens, H. (ed.), CIFOP, Charleroi.
- Tyteca, R., (1996), *On the Measurement of the Environmental Performance of Firms - A literature Review and a Productive Efficiency Perspective*, Journal of Environmental Management, n°46, pp. 281-308.
- Van Den Heuvel, P., (1988), *Energy Dissipation, Operation Time and Production Speed*, Resources and Energy, n°10, pp. 31-54.

- Van Den Hove, S., (1994), *Utilisation de la Thermodynamique et du Concept d'Entropie en économie de l'Environnement*, Cahier C3E, n° 94-21, Université de Versailles St Quentin-en-Yvelines, Guyancourt.
- Van Gool, W. et Bruggink, J.J.C., (eds) (1985), *Energy and Time in the Economic and Physical Sciences*. North-Holland, Amsterdam.
- Wall, G., Sciubba, E. et Naso, V., (1994), *Exergy Use in the Italian Society*, Energy 19 (12), pp. 1267-1274.
- Walter, F., Gubler, F. et Brodmann, U., (2001), *Nachhaltigkeit: Kriterien und Indikatoren für den Energiebereich*, im Auftrag des Bundesamtes für Energie EDMZ, Bern.
- WCED, (1987), *Our Common Future: The Brundtland Report*, Oxford University Press from the World Commission on Environment and Development, New York.
- Weber, J., (2002), *L'évaluation contingente: Les valeurs ont-elles un prix ?*, Académie d'agriculture de France, Paris.
- Young, T., (1991), *Is the Entropy Law Relevant to Economics of Natural Resources Scarcity?*, J. of Environmental Economics and Management, n° 21, pp. 169-179.