



# La demande d'énergie

par Wolf Häfele

## Introduction

Depuis qu'a éclaté la crise de l'énergie, nombre de plans énergétiques ont été proposés qui comportent, pour la plupart, des mesures d'adaptation ou de réduction de la demande énergétique censées prévenir d'éventuelles difficultés d'approvisionnement. Or, on ne semble pas voir clairement sur quelle base il serait possible de parer aux problèmes énergétiques qui nous attendent dans un avenir prévisible. Plus précisément, si l'on cherche à établir une définition plus exacte de la demande d'énergie et de son interaction avec d'autres objectifs, les objectifs économiques notamment, on constate que la notion de demande d'énergie est d'une extrême complexité qui nous échappe encore en partie. C'est pourquoi il est peut-être utile d'exposer de manière assez détaillée les raisons pour lesquelles il est si difficile de bien connaître la demande d'énergie.

## Schémas du circuit de l'énergie

La figure 1 illustre comment l'énergie — évaluée en millions de tonnes d'équivalent charbon ou en gigawatts par an — a irrigué en quelque sorte l'économie de la République fédérale d'Allemagne en 1975. La majeure partie de l'énergie primaire est transformée en formes d'énergie plus facilement utilisables qui constituent l'énergie secondaire. L'électricité et l'essence, pour se borner à deux exemples particulièrement importants, sont ensuite acheminées jusqu'au consommateur. Le principal secteur de consommation regroupe les ménages et les activités commerciales qui absorbent 45% de toute l'énergie secondaire; l'industrie vient ensuite avec 36%, suivie par les transports avec 14%. L'emploi de l'énergie secondaire entraîne également des pertes de transformation qui atteignent 56%.

Outre ces principaux circuits de l'organigramme énergétique représentés à la figure 1, il existe de nombreux autres débouchés moins importants, voire accessoires, que toute étude de la demande d'énergie et de son évolution future doit prendre en considération. Ainsi, par exemple, le chauffage urbain est-il appelé à jouer dans l'avenir un rôle primordial, avec, peut-être, la production mixte. A l'heure actuelle, sa part dans la production d'énergie secondaire ne représente que 4 millions de tonnes d'équivalent charbon mais il n'est pas exclu qu'elle augmente considérablement dans l'avenir. Compte tenu de tous les circuits et de toutes les liaisons dont rend compte la figure, on voit ce qu'a de complexe le phénomène et combien il exige que soient utilisées des catégories et une terminologie assez rigoureusement définies. La figure 2 devrait permettre d'y parvenir. On voit apparaître d'abord l'énergie primaire: charbon, pétrole brut, uranium, etc. La transformation en une autre forme d'énergie entraîne des pertes qui accompagnent la production de l'énergie secondaire. Le transport et la transformation fournissent l'énergie utile qui est consommée localement. L'énergie utile sert, par exemple, à chauffer une pièce, à l'éclairer ou à faire marcher une automobile. Comme on le constatera ultérieurement, ces services ne se situent pas au même niveau conceptuel que l'énergie, ils sont donc représentés à l'intérieur d'un cercle au lieu d'être encadrés.

---

M. Häfele est Directeur adjoint de l'Institut international d'analyse appliquée des systèmes (IIAAS) de Laxenburg (Autriche).

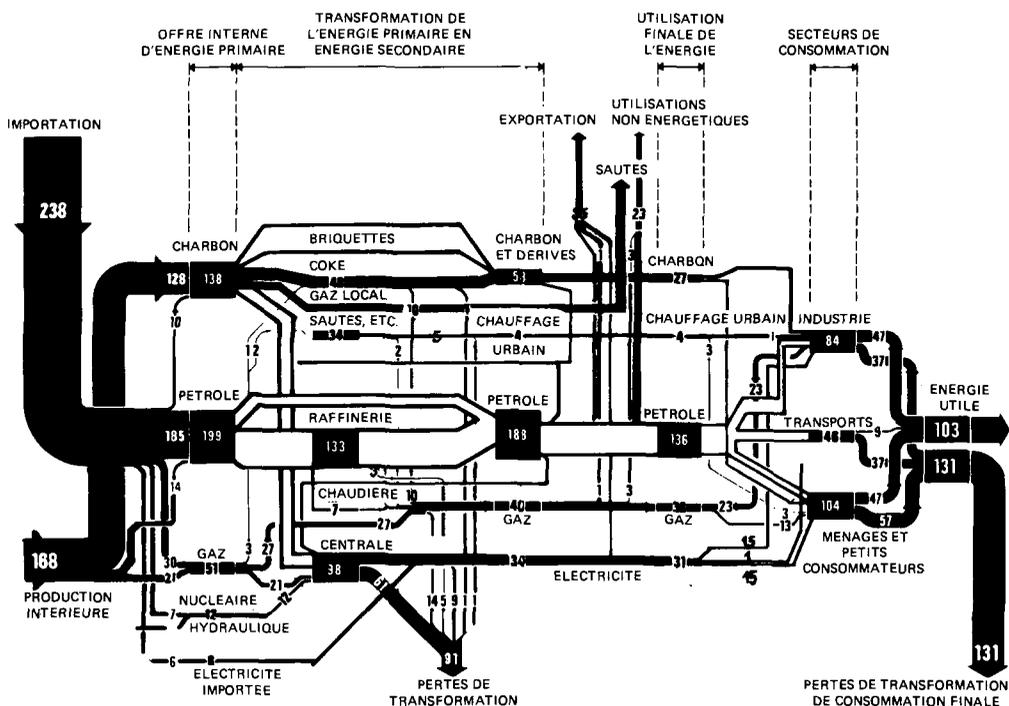
## Efficacité de la transformation

Comment économiser l'énergie? Nous avons vu à la figure 1 que, d'une manière ou d'une autre, près de 75% de l'énergie primaire totale sont perdus. Cette déperdition est-elle inévitable? Pour tenter de répondre à cette question, reprenons à son point de départ le cycle de l'énergie primaire. Au stade de la conversion de l'énergie primaire en énergie secondaire (voir la figure 3), le processus le mieux connu est celui de la production d'électricité dans les centrales. En réalité, l'énergie primaire est transformée en énergie thermique puis en énergie mécanique et, ensuite seulement, en énergie électrique. L'énergie thermique est ici la somme de toutes les énergies cinétiques des molécules d'un gaz ou d'un liquide qui se déplacent au hasard dans des directions différentes. Toutefois, les lois de la physique imposent nécessairement une limite supérieure au passage de la forme d'énergie thermique à des formes ordonnées. Cette limite est généralement connue sous le nom de rendement de Carnot, lequel est toujours inférieur à l'unité. Lorsque la température de sortie du fluide ou du gaz utilisé est de 500 degrés Celsius, le rendement de Carnot est voisin de 63%; toutefois, les centrales n'ont jamais un rendement aussi élevé en raison de déperditions techniques. Ces pertes peuvent être réduites mais non éliminées totalement. L'amélioration du rendement exige des connaissances techniques et des investissements. La figure 4 indique la tendance à long terme de ces améliorations du rendement pour les centrales.

Arrêtons-nous un instant pour examiner rapidement cette tendance de manière plus précise. A la figure 4, la courbe logistique est représentée par une ligne droite. En représentation normale, une courbe logistique prend la forme d'un S qui décrit une croissance différentielle dans un milieu limité (voir la figure 5). La forme en S implique le passage d'une limite inférieure à une limite supérieure et elle est régie par une constante de temps. Comme nous le verrons, un nombre étonnamment élevé de processus évoluent de la sorte et il n'est donc pas vain de comparer les intervalles nécessaires pour le passage d'un point de la courbe à un autre.

La figure 4 révèle l'existence d'une tendance constante à l'augmentation du rendement des centrales. Sur une période suffisamment longue, on peut, de manière générale, présumer que cette tendance se maintiendra. Ce gain d'efficacité permet une économie d'énergie car il diminue la consommation d'énergie primaire nécessaire à la production d'une quantité donnée d'énergie secondaire.

Mais il existe aussi des tendances contraires. Autrefois, le bois et le charbon étaient utilisés directement et il n'y avait aucune perte due à la transformation en énergie secondaire. Des pertes élevées intervenaient cependant au stade de l'extraction de l'énergie utile. La transformation n'est devenue nécessaire qu'à partir du moment où une économie moderne a exigé des formes d'énergie plus aisément utilisables. A l'avenir, l'existence de formes d'énergie primaire impropres à toute utilisation directe rendra les opérations de transformation plus indispensables encore, même là où la commodité d'emploi n'entrera pas en ligne de compte. La figure 6 illustre cette affirmation. L'on y considère l'énergie nucléaire et l'énergie solaire. Leur emploi généralisé dans l'avenir, au-delà de l'an 2000, augmenterait considérablement les pertes de transformation alors que nous bénéficions encore aujourd'hui d'une situation dans laquelle le gaz naturel ne subit aucune perte de transformation et où les pertes de transformation du pétrole brut demeurent faibles. Il faut en outre prendre conscience du fait que la multiplication future des utilisations du charbon entraînera également d'importantes pertes de transformation, attendu que le marché tend à ne plus accepter les solides et que leur transformation en liquides ou en gaz s'imposera ainsi qu'il apparaît à la figure 7. En 1950, quelque 80% de l'énergie secondaire se présentaient sous forme solide mais, depuis lors, le marché s'est orienté vers les liquides dont la prépondérance a atteint son apogée au début des années 1970. L'emploi du gaz s'est aussi développé rapidement, de même que celui de l'électricité. Cette dernière représente actuellement 10 à 12% de la totalité de l'énergie secondaire et, pour l'an 2000, de nombreuses projections évaluent sa part à près de 20 à 25%.



**Figure 1.** Circuit de l'énergie dans l'économie de la République fédérale d'Allemagne en 1975 (en millions de tonnes d'équivalent charbon ou en gigawatts par an). Si l'on divise les unités par 33,5, on obtient des unités de  $10^{15}$  Btu. La quantité d'énergie primaire disponible représentait 238 millions de tonnes (importations) plus 168 millions de tonnes (production interne), soit au total 406 millions de tonnes d'équivalent charbon ou de gigawatts par an, soit encore 12 fois  $10^{15}$  Btu. Ces quantités ont été fournies par l'importation à concurrence de 59%, essentiellement sous forme de pétrole brut (45%) et de gaz naturel (7,3%). La production interne de charbon a représenté 31,5%. La contribution de l'ensemble des autres sources a été faible en 1975. La majeure partie de l'énergie primaire est transformée en formes d'énergie plus facilement utilisables qui constituent l'énergie secondaire. L'électricité et l'essence, pour se borner à deux exemples particulièrement importants, sont ensuite acheminées jusqu'aux consommateurs. Les pertes dues à la transformation et au transport représentent 91 millions de tonnes de charbon, soit 22% de la consommation primaire. Le principal secteur de consommation regroupe les ménages et les activités commerciales qui absorbent 45% de l'énergie secondaire totale. L'industrie vient ensuite, avec 36%, suivie par les transports, avec 14%. L'emploi de l'énergie secondaire entraîne également des pertes de transformation qui atteignent 56%. Ainsi, sur 406 millions de tonnes d'équivalent charbon, 103 seulement, soit environ 25%, sont utilisés de manière productive, ce qui signifie, par exemple, qu'ils sont transformés en mouvement mécanique ou en lumière (ou qu'ils servent à d'autres fins).

A ce stade de l'analyse, une importante remarque s'impose au sujet de l'énergie nucléaire. Cette énergie était jadis produite et utilisée quasi exclusivement pour la production d'électricité. Rien n'est plus normal puisque l'énergie nucléaire devait être nécessairement transformée en énergie secondaire et le secteur de la production électrique avait déjà pratiqué la transformation de l'énergie sur une grande échelle longtemps avant l'utilisation de l'énergie nucléaire. Cependant, le problème le plus urgent à moyen et à long terme, en ce qui concerne l'énergie, n'est pas d'accroître la production d'électricité, mais de trouver des substituts au pétrole et au gaz naturel à bon marché qui alimentent le marché de l'énergie secondaire à concurrence de plus de 75%.

Pour satisfaire plus de 25% des besoins d'énergie secondaire, l'énergie d'origine nucléaire devrait se présenter sous forme gazeuse ou liquide; la technologie nucléaire doit prendre conscience de cette exigence et évoluer en conséquence. Ceci semble d'ailleurs possible si

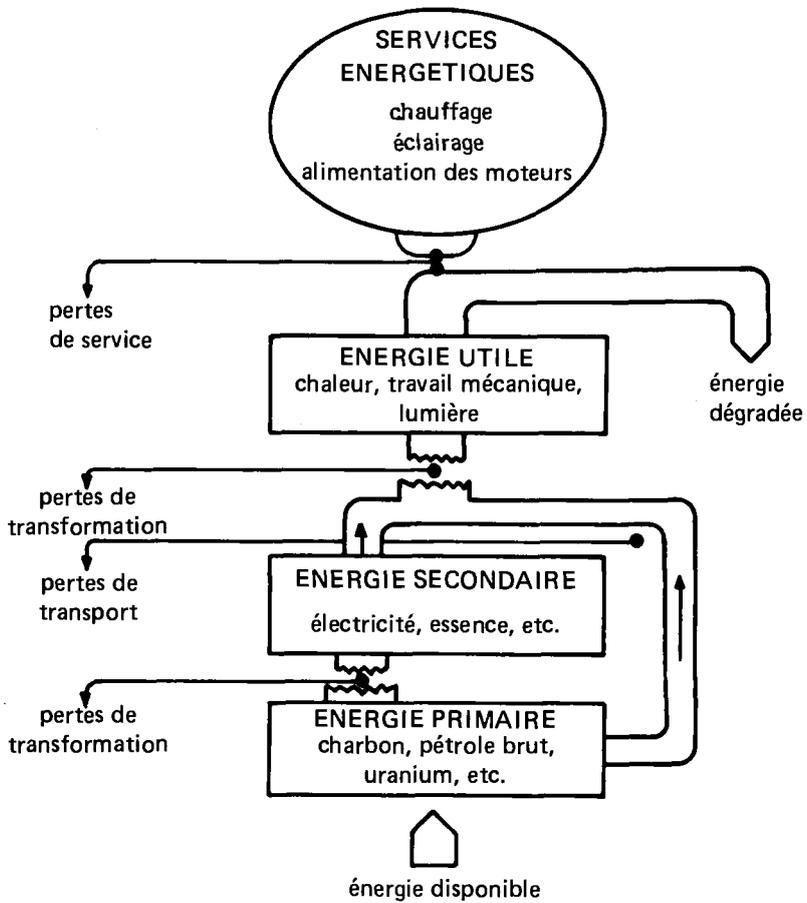


Figure 2. Schéma simplifié du circuit de l'énergie et des services énergétiques.

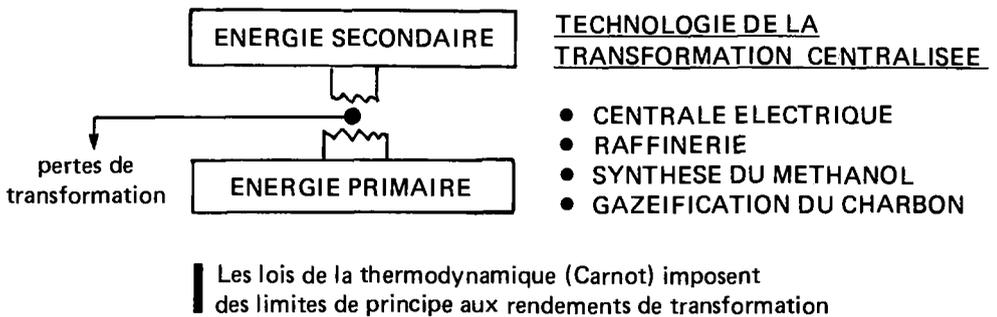


Figure 3. La conversion de l'énergie primaire en énergie secondaire entraîne nécessairement des pertes.

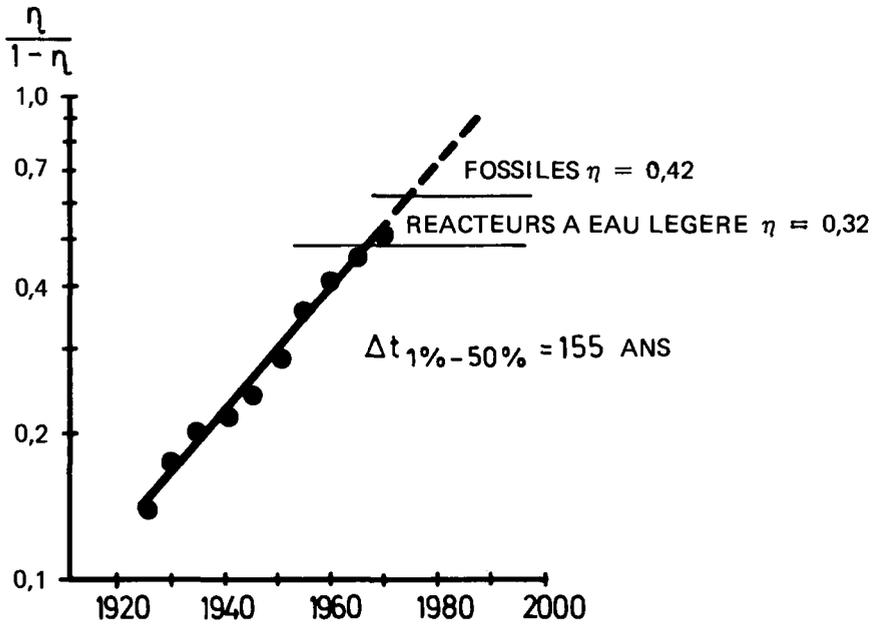


Figure 4. Tendence à long terme dans l'amélioration du rendement des centrales électriques. (Source: n° 9 de la bibliographie).

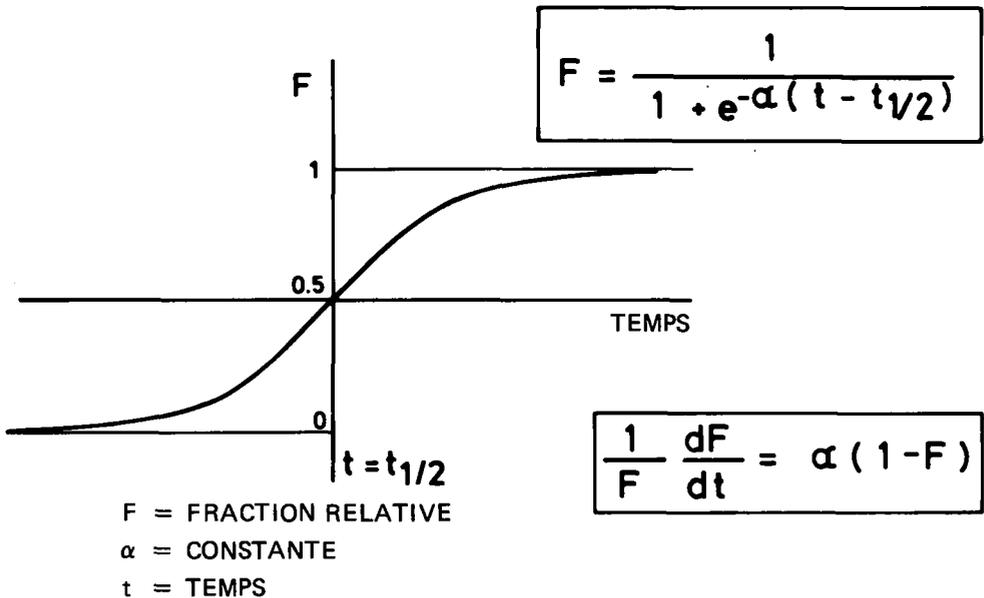


Figure 5. La courbe logistique en S décrit une croissance différentielle dans un milieu limité. La forme en S implique le passage d'une limite inférieure ( $F = 0$ ) à une limite supérieure ( $F = 1$ ) et elle est régie par une constante de temps. Un nombre élevé de processus évoluent de la sorte et il est souvent intéressant de comparer l'intervalle nécessaire pour que la variable S passe, par exemple, de 0,01 à 0,05, c'est-à-dire au point central de la courbe.

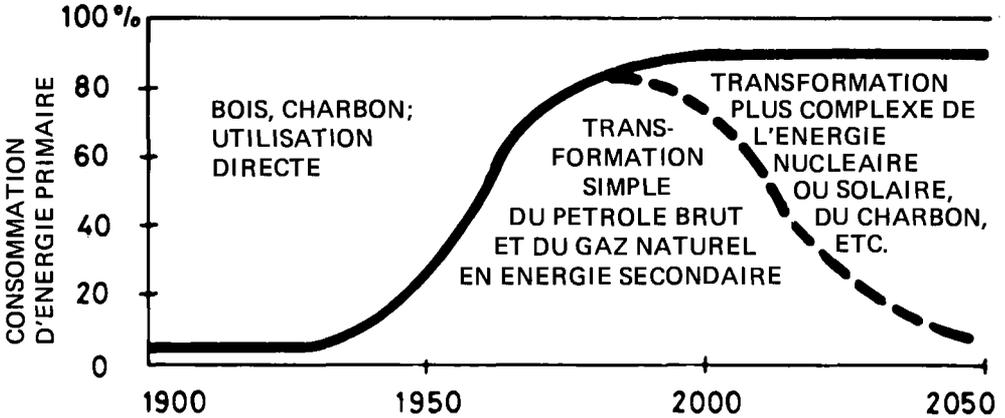


Figure 6. La projection de la consommation d'énergie de la République fédérale d'Allemagne révèle un écart croissant entre l'énergie primaire et l'énergie secondaire. Pour l'avenir, l'emploi largement répandu de l'énergie nucléaire et de l'énergie solaire après l'an 2000 augmenterait notablement les pertes de transformation.

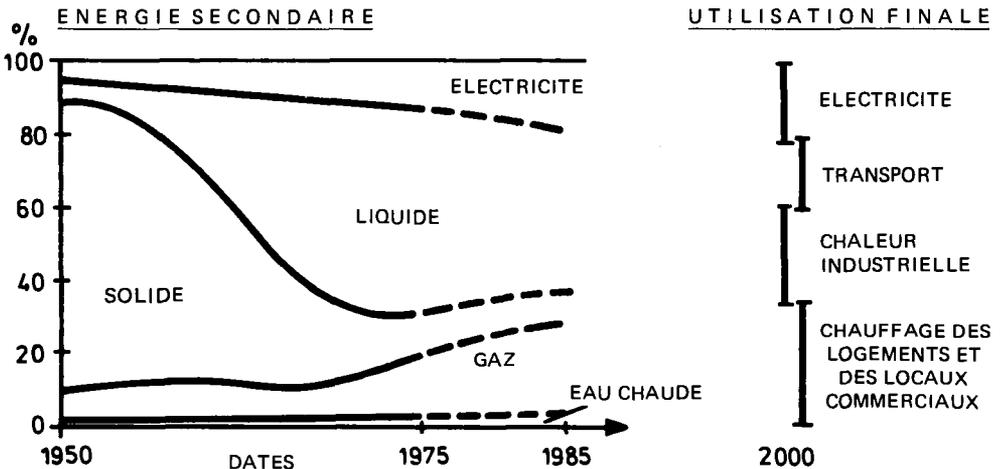
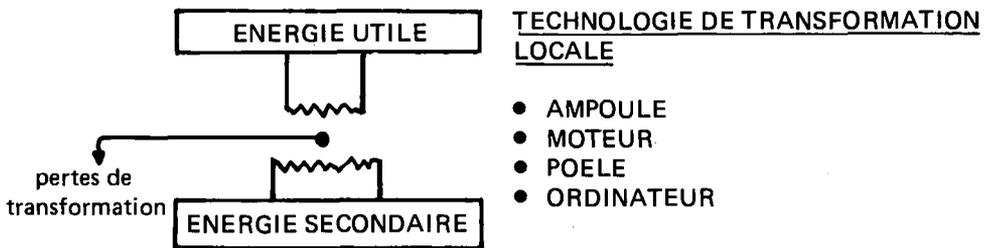


Figure 7. Les courbes ci-dessus décrivent la répartition et l'utilisation finale de l'énergie secondaire en République fédérale d'Allemagne. La tendance du marché, défavorable aux combustibles solides, imposera nécessairement la transformation du charbon en liquide ou en gaz. En 1950, près de 80% de l'énergie secondaire se présentaient sous forme solide. Dès 1975, la prédominance revenait aux combustibles liquides. Au cours de ces dernières années, l'emploi du gaz et de l'électricité s'est développé.



Les lois de la thermodynamique n'imposent pas nécessairement des limites de principe aux rendements de transformation

Figure 8. La transformation de l'énergie secondaire en énergie utile entraîne des pertes.

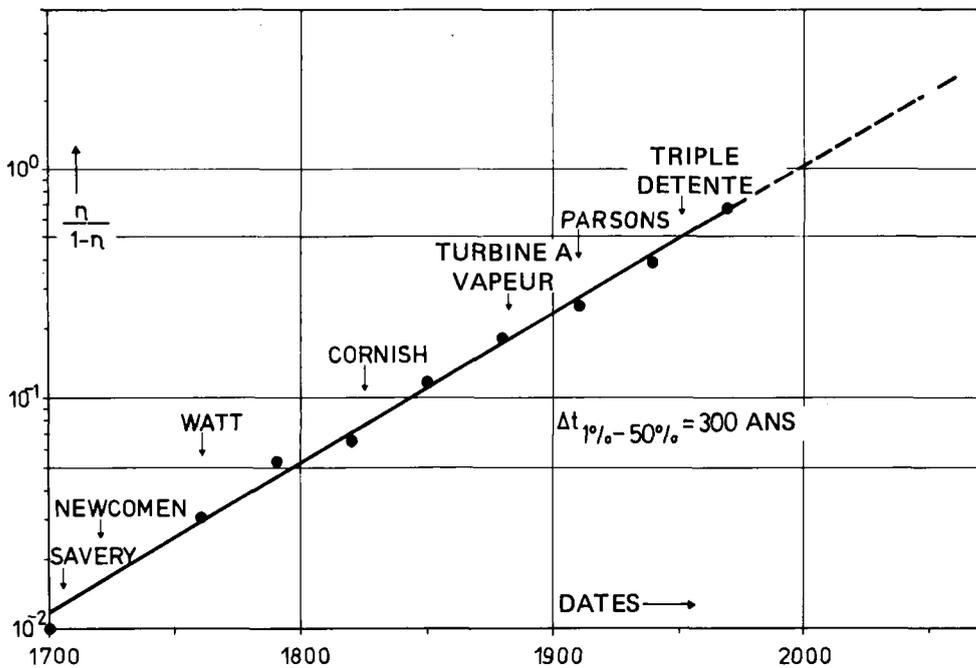


Figure 9. Le rendement des moteurs manifeste une tendance constante à l'amélioration.

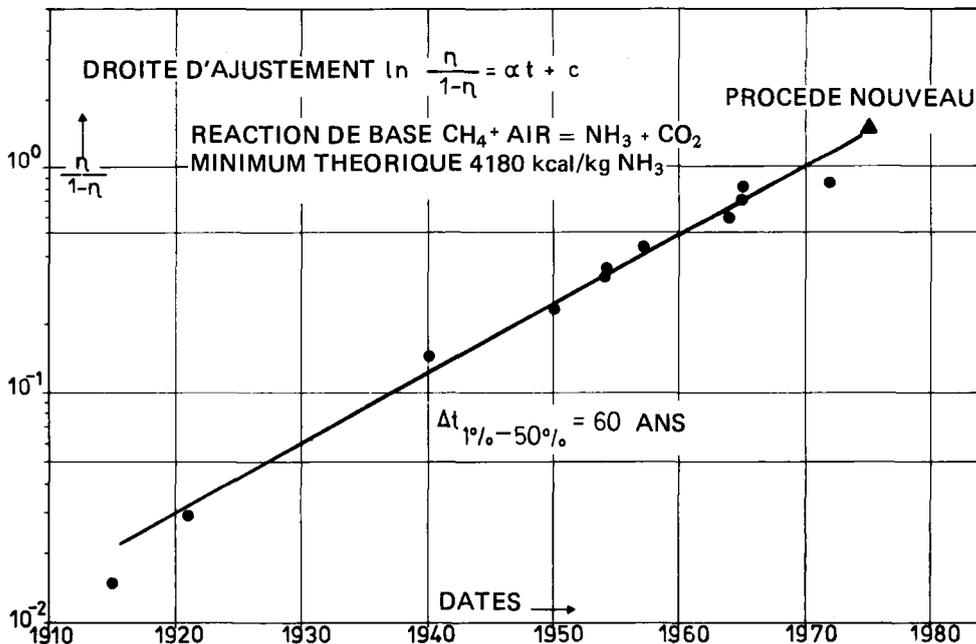
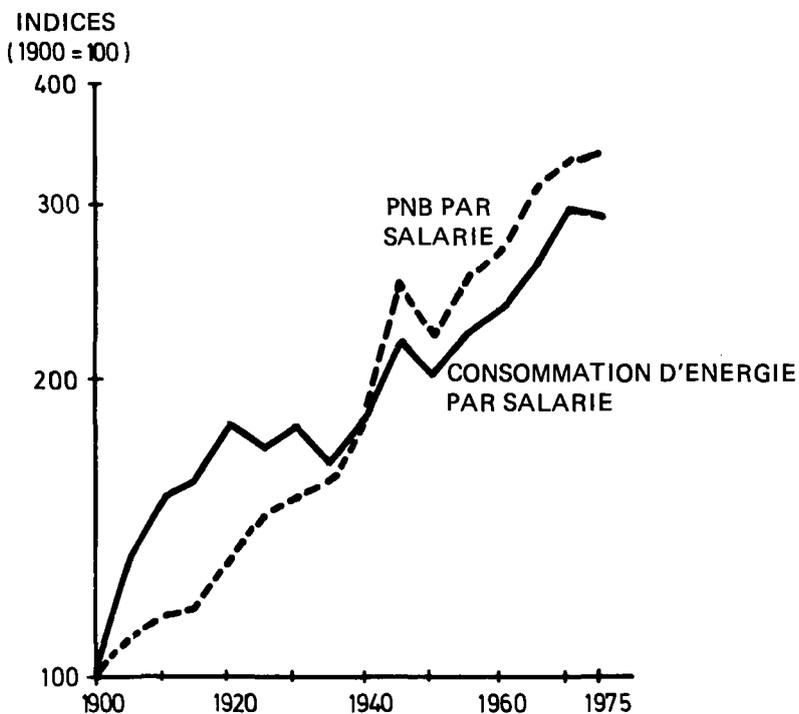
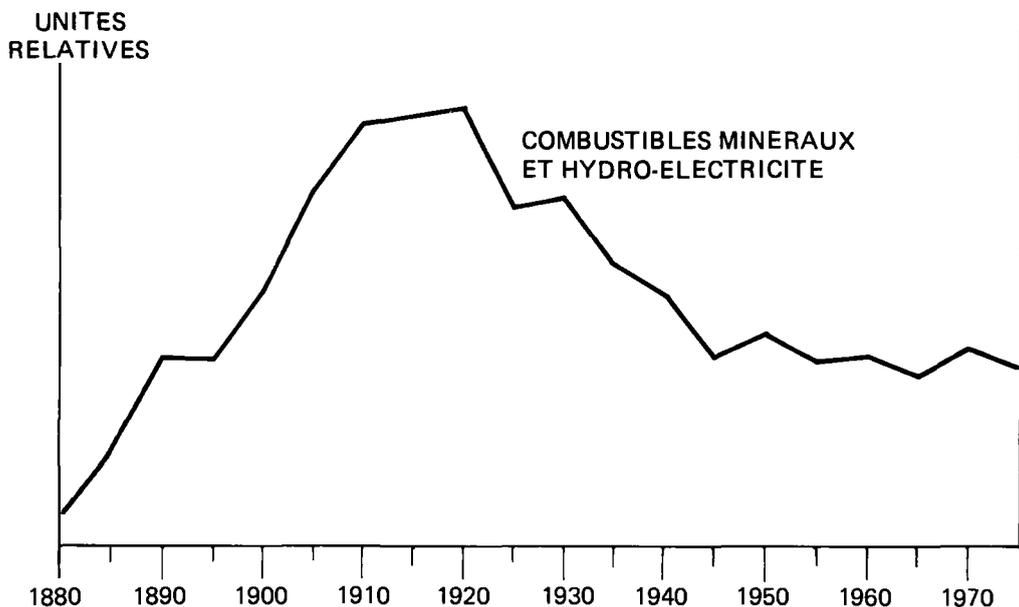


Figure 10. Le rendement de la production d'ammoniac s'est lui aussi constamment amélioré. (Source: n° 13 de la bibliographie).



**Figure 11.** Produit national brut (PNB) par salarié et consommation d'énergie par salarié aux Etats-Unis d'Amérique. (Source: n° 12 de la bibliographie).



**Figure 12.** La consommation d'énergie par unité de PNB aux Etats-Unis d'Amérique a augmenté jusqu'en 1920 et décroît depuis lors. (1880–1950 Source: S.H. Schurr et B.C. Netschert, *Energy in the American Economy*, 1960; 1955–1975 Source: J. Alterman, Bureau of Economic Analysis, à paraître).

le prix du baril d'équivalent pétrole dépasse 20 à 25 dollars. Le partenaire naturel de l'énergie d'origine nucléaire est le charbon, ce qui est également compréhensible.

Pour l'énergie d'origine nucléaire, les pertes de transformation ne soulèvent pas de problème à long terme. Lorsque la surgénération sera utilisée, l'approvisionnement en uranium cessera d'être source de difficultés. Dès lors, peu importe que les pertes de transformation augmentent la consommation d'énergie primaire pour une demande donnée d'énergie secondaire. En revanche, le problème de l'investissement en capitaux devient primordial.

Mais poursuivons notre raisonnement. La transformation de l'énergie secondaire en énergie utile entraîne également des pertes (voir la figure 8). On peut négliger, en revanche, les pertes en cours de transport. Le rendement de Carnot impose des limites de principe pour certaines applications et non pour d'autres; il est cependant toujours possible d'améliorer le rendement.

Ainsi, par exemple, on remarque une tendance constante à l'amélioration dans le cas des moteurs (voir la figure 9) comme dans celui de la production d'ammoniac (voir la figure 10). Il est remarquable de voir à quel point les passages à des niveaux de rendement supérieurs suivent la courbe logistique et combien grands sont les intervalles de temps correspondants.

Contrairement à la transformation de l'énergie primaire en énergie secondaire, qui s'opère habituellement dans d'importantes centrales à grand rendement, la transformation de l'énergie secondaire en énergie utile est décentralisée et s'effectue dans des millions d'automobiles, de poêles, d'ampoules et autres dispositifs d'emplois finals. Cette utilisation locale et décentralisée de l'énergie est souvent de faible rendement, comme c'est le cas par exemple dans les vieux poêles des logements anciens ou dans les cheminées. Ces millions d'appareils d'emploi final appartiennent à l'infrastructure économique et culturelle et il est à la fois difficile et long de leur apporter des modifications dans un souci d'économies d'énergie ou, mieux encore, en vue d'utiliser intelligemment cette énergie.

## Energie et économie

Au moment de l'emploi final, l'énergie se présente comme un apport à l'économie et les millions de dispositifs d'emploi final relèvent de l'analyse économique. Ils sont d'ailleurs étudiés de façon globale, c'est-à-dire sous leur aspect macro-économique. Le rapport entre le produit national brut (PNB) et la consommation d'énergie est bien connu. La figure 11 met en parallèle le produit national brut créé par salarié et l'évaluation de la consommation d'énergie par salarié aux Etats-Unis d'Amérique pour les 75 dernières années. Deux remarques s'imposent:

1. De toute évidence, les deux courbes sont sensiblement parallèles et l'augmentation du PNB par salarié exige, grosso modo, la même augmentation relative d'énergie par salarié;
2. L'examen plus précis de ces courbes révèle que l'augmentation relative d'énergie par salarié est légèrement moindre que celle du PNB par salarié; l'énergie est mieux employée ou remplacée par quelque chose d'autre.

On peut sans doute interpréter cette constatation comme l'indice d'une possibilité d'économie d'énergie. La figure 12 montre le rapport entre la consommation d'énergie (combustibles minéraux et énergie hydraulique) et le PNB aux Etats-Unis d'Amérique. Ce rapport s'est accru à l'époque de la première révolution industrielle qu'a connue ce pays. Il a ensuite atteint un maximum et diminue depuis lors car le PNB est de plus en plus largement déterminé par la production de matériels complexes, tels que le matériel électronique, la fourniture de services généraux (le secteur tertiaire de l'économie) et par la production d'équipement lourd.

Une caractéristique importante de l'économie d'un pays réside dans la valeur de son capital national, c'est-à-dire de la somme des biens investis nécessaires à la création du PNB. La

main-d'œuvre et l'énergie sont les moteurs de ce capital générateur de PNB. Il est donc intéressant d'étudier la consommation d'énergie par rapport au capital national comme le montre la figure 13. Ce rapport est voisin de un watt par dollar. Dans les pays à économie planifiée, ce rapport dépasse la moyenne mondiale en raison, vraisemblablement, de l'importance particulière qu'ils donnent à l'équipement lourd.

Il est, en revanche, curieux de constater que le rapport est essentiellement le même dans les pays développés (0,71) et dans les pays en développement (0,77), alors que la valeur du capital national par habitant diffère largement. Il serait tentant de conclure que le type d'économie à l'origine du PNB est identique dans ces deux catégories de pays, alors que la participation relative de la population à l'économie varie considérablement. C'est à l'urbanisation que je veux en venir. En effet, le développement des pays en développement semble passer par le stade de l'urbanisation qui entraîne les mêmes schémas de consommation d'énergie primaire, secondaire et utile que dans les pays industrialisés.

La figure 14, qui présente une comparaison entre la consommation d'énergie et la densité de la population en République fédérale d'Allemagne et en Inde, paraît corroborer cette proposition. La densité moyenne de consommation d'énergie diffère considérablement (de 1 à 12 environ), tandis que la densité de consommation d'énergie en milieu urbain ne diffère que dans la proportion de 1 à 1,5. Bien que l'infrastructure technique des villes soit analogue dans les deux pays, on recense 6000 habitants au kilomètre carré dans les zones urbaines de l'Inde, contre seulement 1500 en République fédérale d'Allemagne. En d'autres termes, les caractéristiques de l'infrastructure semblent fortement déterminées par la quantité de services offerts, et seul le nombre des personnes qui en font usage varie très largement.

La consommation relativement élevée d'énergie au mètre carré dans les villes indiennes est due largement à leur forte densité de population. La différence entre les valeurs moyennes pour la République fédérale d'Allemagne et pour l'Inde doit donc provenir des zones rurales. La consommation d'énergie par mètre carré dans les zones rurales de la République fédérale d'Allemagne est environ 20 fois plus grande que dans les zones correspondantes en Inde, alors que les densités de population sont très comparables. L'on doit donc se garder de sous-estimer les rapports entre l'infrastructure énergétique et l'infrastructure économique générale. On recommande souvent aux pays en développement d'utiliser d'autres voies pour se développer. On cite, par exemple, les techniques douces telles que l'énergie éolienne et l'énergie solaire utilisées localement selon un schéma décentralisé, c'est-à-dire dans les zones rurales. Mais ces régions ne jouent aucun rôle moteur.

Les rapports entre l'infrastructure énergétique et l'infrastructure économique générale, c'est-à-dire le schéma complexe des utilisations de l'énergie, appellent une analyse quantitative approfondie. L'une des solutions pour ce faire est d'étudier les relations réciproques entre la consommation d'énergie et les prix de l'énergie, comme on a tenté de le faire au moyen des méthodes économétriques mises au point et employées particulièrement aux Etats-Unis. On ne peut, à ce propos, manquer d'évoquer les noms de Jorgenson, Houthakker, Nordhaus et Manne. Ces méthodes se fondent essentiellement sur diverses élasticités, l'élasticité étant le pourcentage de variation de la consommation d'énergie en fonction de la variation en pourcentage d'un autre paramètre tel que le PNB, par exemple. Les élasticités, calculées à l'aide de séries statistiques couvrant une période de plusieurs années, se réfèrent donc implicitement à une infrastructure énergétique/économique existante. Dans ce cadre, il apparaît alors possible d'étudier la consommation probable d'énergie à relativement court terme, pour une période de dix ans par exemple. La figure 15 expose les caractéristiques de la méthode économétrique. Les valeurs de la demande sont calculées à l'aide d'un certain nombre d'élasticités. Elles rapportent la consommation nette d'énergie par habitant au prix net relatif de l'énergie et au produit intérieur brut par habitant.

	RAPPORT ENTRE L'ENERGIE ET LE CAPITAL NATIONAL EN WATTS PAR DOLLAR DES ETATS-UNIS (1973)	CAPITAL NATIONAL PAR HABITANT EN DOLLARS DES ETATS-UNIS (1973)
MONDE	0,87	2000
PAYS DEVELOPPES A ECONOMIE DE MARCHÉ	0,71	8500
PAYS EN DEVELOPPEMENT	0,77	380
PAYS A ECONOMIE PLANIFIEE (MOINS LA CHINE)	1,43	2700

**Figure 13.** La consommation d'énergie par rapport au patrimoine national (en watts par dollar des Etats-Unis) est très comparable dans les pays développés à économie de marché et dans les pays en développement, alors même que le capital national par habitant est éminemment différent. (Données sur le capital national: W. Ströbele, 1975).

	DENSITE DE CONSOMMATION D'ENERGIE W/m <sup>2</sup>			DENSITE DE POPULATION habitants/km <sup>2</sup>		
	Moyenne	Villes*	Campagnes <sup>+</sup>	Moyenne	Villes*	Campagnes <sup>+</sup>
RFA	1,2	7,5	0,75	245	1500 <sup>●</sup>	150
INDE	0,10	12	0,04	168	6000 <sup>■</sup>	135

\* Conurbations

<sup>+</sup> Exploitations agricoles et petites agglomérations

● 45% de l'ensemble de la population

■ 9% de la population totale

**Figure 14.** Comparaison des densités de consommation d'énergie et de peuplement en République fédérale d'Allemagne et en Inde. Les habitants des zones rurales de la République fédérale d'Allemagne consomment près de 20 fois plus d'énergie par m<sup>2</sup> que les habitants des zones rurales indiennes.

Chapman et Slesser ont attaché leur nom à une autre méthode: l'analyse énergétique, démarche de caractère plus technique qui consiste à étudier la part d'énergie que comportent les biens et services. La figure 16 présente certains résultats obtenus par cette méthode. Elle indique la valeur du kWh(th) par dollar de production économique finale pour divers secteurs de l'économie française en 1971. Les montants sont élevés pour l'acier et les métaux non ferreux, ainsi que pour l'énergie indirecte consommée pour les métaux ouvrés; les valeurs sont également assez élevées pour les secteurs de la construction et du verre. On constate à l'évidence combien ces résultats rendent fidèlement compte d'une infrastructure et d'une technologie existantes.

### Services énergétiques et information

L'utilisation de l'énergie n'est pas une fin en soi. Nous avons vu que la main-d'œuvre et l'énergie sont les éléments moteurs du capital existant pour la création d'un produit national brut (PNB) donné qui se mesure en dollars et non en kWh. Que se passe-t-il

$$\text{ELASTICITE } (\beta, \gamma) = \frac{\% \text{ VARIATION DE LA DEMANDE}}{\% \text{ VARIATION DU PRIX, DU REVENU}}$$

$$Q_t = \text{const} \cdot \prod_{\theta=0}^n P_{t-\theta}^{\beta} \cdot \prod_{\theta=0}^m Y_{t-\theta}^{\gamma}$$

$Q_t$  = consommation nette d'énergie par habitant

$P_t$  = prix net relatif de l'énergie

$Y_i$  = produit intérieur brut réel par habitant

$\beta$  = élasticité des prix

$\gamma$  = élasticité des revenus

**Figure 15.** La méthode économétrique visant à déterminer les relations réciproques entre la consommation d'énergie et les prix de l'énergie fait appel à la notion "d'élasticité" qui exprime le pourcentage de variation de la consommation d'énergie en fonction de la variation en pourcentage d'une autre grandeur telle que le prix, le revenu, etc.

SECTEUR INDUSTRIEL	ENERGIE TOTALE CONSOMMEE PAR UNITE PRODUITE	ENERGIE DIRECTE CONSOMMEE	ENERGIE INDIRECTE CONSOMMEE
Produits alimentaires	2,20	1,72	0,48
Bâtiment	16,07	13,98	2,09
Verre	16,03	14,54	1,49
Sidérurgie	34,85	28,28	6,57
Métaux non-ferreux	33,16	31,33	1,83
Transformation des métaux	11,44	1,32	10,12
Electro-mécanique	6,01	1,59	4,42
Chimie	11,41	9,40	2,01
Vêtement	2,92	2,09	0,83
Papier	5,62	4,44	1,18
Divers	4,93	3,00	1,93

**Figure 16.** Energie totale consommée en kWh(th) par dollar de production économique finale pour les divers secteurs de l'économie française en 1971. Les valeurs élevées enregistrées pour les secteurs de l'acier, des métaux non ferreux, du verre et de la construction rendent fidèlement compte de l'infrastructure et de la technologie existantes. (Source: n° 2 de la bibliographie).

lorsque des kWh contribuent à la production de dollars? L'utilisation d'énergie est une forme de service, et non la seule (voir figure 17). Prenons, par exemple, un potier au travail. Faire tourner son tour est une chose, mais avoir l'habileté de fabriquer des articles de poterie sans trop de déchets est une tout autre chose. Le potier, lui aussi, doit investir. Plus il est habile et plus les investissements sont judicieux, moins il lui faut d'énergie pour produire la quantité prévue d'articles de poterie. S'il n'est pas adroit, il doit faire de multiples essais pour produire un article et la somme d'énergie consommée chaque fois est considérable. Par ailleurs, plus sa conception de la poterie est bonne, plus le produit national brut qu'il crée est élevé. Prenons comme autre exemple celui d'une maison agréablement chauffée. La quantité d'énergie nécessaire à fournir peut varier considérablement en fonction de l'isolation. Le soin avec lequel on conserve la chaleur joue aussi un rôle important, selon que les portes et les fenêtres restent fermées ou non, etc. Le résultat est aussi très différent si les services énergétiques sont assurés uniquement lorsqu'ils répondent à un réel besoin.

Un autre élément crucial est la propreté des services énergétiques. De nombreuses industries préfèrent l'électricité à toute autre forme d'énergie parce qu'elle est d'une régulation et d'un maniement propres et faciles; c'est ce que S.H. Schurr appelle le rendement économique élevé de l'électricité. Tout ceci montre bien que les services énergétiques doivent être considérés par rapport à d'autres services, qui, pris dans leur ensemble, concourent à l'obtention d'un schéma choisi, comme un article de poterie ou une pièce bien chauffée. La différence entre une pièce bien chauffée et le chauffage d'une pièce n'est pas négligeable. La première représente un schéma, le deuxième se réfère à l'emploi de moyens, par exemple à l'utilisation d'énergie. La formation des schémas se situe à un niveau plus abstrait que celle des moyens. Par service énergétique on entend donc la transposition des utilisations de l'énergie vers ce niveau plus abstrait que nous appelons le niveau de l'"information". Par rapport à la théorie formelle de l'information de Shannon et au schéma d'entropie et de négentropie, il est vrai qu'aujourd'hui la science ne permet pas encore de réunir habileté, investissements et services énergétiques en une théorie unifiée; ce qui, en fait, est la raison dernière pour laquelle il est si difficile de comprendre vraiment ce qu'est la demande d'énergie. Ce problème est souvent évoqué lorsqu'on dit qu'il faut tenir compte de la qualité des utilisations de l'énergie.

La relation entre l'utilisation de l'énergie et l'information n'est pas immuable. A la limite, on peut fournir de l'énergie sans consommer d'énergie. C'est ce qu'une Gedanken-experiment ou expérience fictive permet de démontrer de façon saisissante (voir la figure 18). Prenons un emplacement situé en mer. Le soleil qui brille au-dessus de la mer engendre une différence de température des couches supérieures de l'eau. Cette variation de température peut être utilisée de manière tout à fait classique au moyen d'une machine de Carnot. La chaleur de la couche superficielle de l'eau est prélevée à une température  $T_2$  et utilisée dans la machine de Carnot; une partie de cette chaleur est transformée en travail mécanique. La chaleur résiduelle est transmise aux couches marines inférieures à une température  $T_1$ . Si l'on utilise le travail mécanique pour comprimer de l'air, celui-ci s'échauffe dans des conditions isothermes et l'énergie produite par le travail mécanique est restituée à la couche supérieure de l'eau d'où elle venait. Lorsque la bouteille d'air comprimé est livrée en ville, il n'y a certainement pas transport d'énergie. L'énergie interne d'un gaz (idéal) dépend uniquement de la température et non de la pression et dans le cas qui nous occupe, la température  $T_2$  est censée n'avoir pas varié. Le potentiel énergétique de la mer demeure le même, mais l'entropie de cet emplacement marin a augmenté, par un phénomène connu sous le nom d'entropie de mélange. La même quantité d'entropie affectée d'un signe négatif, ou négentropie, a été transportée sous forme d'air comprimé vers des villes. Si les processus sont inversés, la négentropie créée est égale à la production d'entropie à l'emplacement considéré. En milieu urbain, l'air peut se dilater pour mettre en mouvement, par exemple, un

# I "INFORMATION" S'ENTEND DE L'ENERGIE FOURNIE POUR OBTENIR UN SCHEME CHOISI

POUR PRODUIRE DES ARTICLES DE POTERIE, IL FAUT: SERVICES ENERGETIQUES ET INVESTISSEMENTS ET HABILITE

POUR QU'UNE MAISON SOIT BIEN CHAUFFEE, IL FAUT BEAUCOUP OU PEU D'ENERGIE SELON L'ISOLATION ET LE MODE D'ENTRETIEN

DISPONIBILITE, FIABILITE, SOUPLESE ET PROPRETE DES SERVICES ENERGETIQUES SONT AUSSI DES APPORTS A L' "INFORMATION"

## II PAR SERVICE ENERGETIQUE ON ENTEND LA TRANPOSITION DE L'UTILISATION DE L'ENERGIE AU NIVEAU DE L' "INFORMATION"

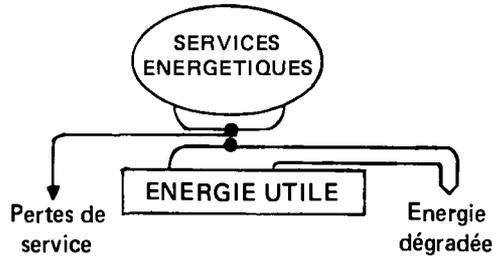


Figure 17. Services énergétiques et "information"

véhicule. Rappelons-nous que d'après notre terminologie, un véhicule en marche est un service énergétique, qui représente un schème d'information. En se détendant, l'air se refroidit et l'atmosphère environnante fournit la quantité de chaleur nécessaire au moteur. Lorsque le véhicule est en marche, la friction qui en résulte dégrade l'énergie mécanique en chaleur frictionnelle. Avec cette dégradation de la qualité de l'énergie, la chaleur est restituée à l'atmosphère d'où elle venait et le potentiel énergétique de l'emplacement urbain demeure lui aussi inchangé.

En perturbant le schème matériel de l'emplacement marin, nous avons créé un schème d'information qui est utilisé dans une économie; en d'autres termes, l'économie fonctionne sans dépense d'énergie. La Gedanken-experiment se terminerait par le retour progressif au gradient de température océanique et l'on pourrait en renouvelant l'expérience maintenir ainsi l'économie en action. Cette expérience prouve qu'il est pour le moins ambigu de parler de consommation d'énergie puisque, comme il vient d'être démontré, une économie peut fonctionner sans consommation d'énergie. Ce qui est consommé, c'est l' "information". Cette expérience met en évidence la différence fondamentale qui existe entre utilisation d'énergie et service énergétique, ou "information". En fait, il existe une loi de conservation de l'énergie comme il en existe une pour la masse et le mouvement, tandis qu'il n'en existe pas pour l'entropie ou l'information. L'entropie reste constante ou continue d'augmenter. On peut donc libérer des quantités indéfinies de négentropie ou d'information. Ou, en d'autres termes, la relation entre l'utilisation de l'énergie et l'information dépend des schèmes utilisés et c'est en ce sens qu'elle est indéfinie.

C'est précisément pour cette raison qu'il est si difficile de comprendre ce qu'est la demande d'énergie. On a observé que c'est l'infrastructure d'une économie qui détermine la relation entre l'utilisation de l'énergie et le produit national brut. Ce dernier est l'une des unités de mesures phénoménologiques de l'information au sens que nous lui donnons ici. Mais ceci nous amène à constater que le potentiel de développement d'une économie est essentiellement illimité, ce qui veut dire qu'il n'existe pas de loi naturelle pour en limiter la croissance. C'est là une affirmation qui peut paraître trop absolue. Avant de l'énoncer,

il faut rappeler le degré de complexité auquel on est conduit en explorant cette absence de limite. La direction de l'évolution d'une économie ne peut que mener à des activités de plus en plus immatérielles. Et lorsqu'on met l'accent sur l'importance croissante du secteur des services d'une économie c'est exactement ce que l'on veut dire. Et ceci pourrait être le prélude à une réduction de l'énergie fournie pour chaque création de produit national brut.

Il n'est peut-être pas inutile d'illustrer cette idée par un exemple pratique, extrême, il est vrai, mais authentique. Les tout premiers ordinateurs numériques des années 1950, comme l'IBM 650, exigeaient plusieurs kilowatts d'électricité et un certain laps de temps pour le traitement des données, alors qu'aujourd'hui, le même service requiert quelques milliwatts et beaucoup moins de temps. La consommation d'énergie est de 10 000 à 100 000 fois moindre. Mais ce progrès a demandé une compréhension plus approfondie de la physique de l'état solide et la création d'une industrie de pointe. Il a fallu mobiliser tout un ensemble de connaissances techniques et de progrès scientifiques dont les économies d'énergie ne représentent que l'une des conséquences importantes parmi beaucoup d'autres. Des progrès aussi considérables et aussi divers sont sans doute nécessaires au plan de la science, de la technologie et de la gestion pour modifier l'infrastructure qui rattache logiquement l'utilisation de l'énergie aux services énergétiques et qui, à son tour, influence la demande d'énergie.

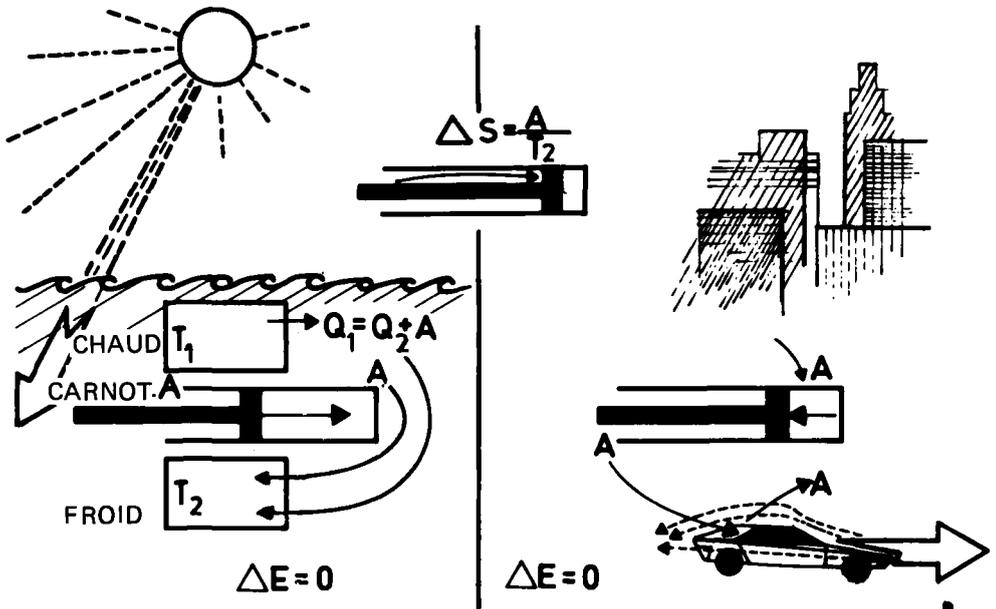
### **Durée de l'évolution**

Ces progrès prennent du temps. Le temps est la clé des stratégies énergétiques modernes; aussi importe-t-il de conclure notre exposé par les caractéristiques temporelles de l'évolution que subit la demande d'énergie. Les composantes sont au nombre de trois (voir figure 19). Tout d'abord, l'accroissement de la population. Il est vrai qu'il n'entraîne pas immédiatement une augmentation de la demande d'énergie. Sans capitaux ou sans infrastructure, l'accroissement de la population ne peut se traduire par une augmentation de la demande d'énergie; nous l'avons vu lorsque nous avons comparé l'Inde et la République fédérale d'Allemagne. Mais à la longue, l'accroissement de la population influera sur la demande d'énergie. Dans les pays développés, l'accroissement de la population réagit plus immédiatement sur la demande d'énergie et dans les quarante à soixante prochaines années, le doublement possible de la population mondiale aurait certainement une influence sur la demande mondiale d'énergie.

Le deuxième élément qui influence l'évolution de la demande d'énergie est la croissance économique. Un taux de croissance économique de 5% par an signifie un doublement du produit national brut tous les 15 ans. En l'absence d'un changement notable de l'infrastructure, ceci peut également, grosso modo, avoir pour effet de doubler la demande d'énergie. Seul le troisième élément entraîne une modification de l'infrastructure; il s'agit d'un changement des modes d'utilisation des services, notamment dans le domaine de l'énergie. Nous avons vu qu'obéissant à un déterminisme, ces modifications se font selon une courbe logistique, et les données correspondantes nous permettent de dire qu'une modification significative qui réduirait de moitié la demande d'énergie prendrait probablement de 50 à 100 ans.

### **Conclusion**

Ce bref exposé avait pour but de souligner l'infinie complexité de la demande d'énergie. Au contraire les caractéristiques de la distribution d'énergie, comme par le passé, semblent être beaucoup plus simples. L'énergie est fournie par l'intermédiaire de grandes installations techniques centralisées et la science et l'art mobilisés pour les créer sont extrêmement avancés. La production d'énergie fait appel à des lois de la nature qui sont bien comprises, notamment aux principes de conservation de l'énergie, du mouvement et de la masse. Il n'est donc pas surprenant que jusqu'à présent l'analyse se soit surtout concentrée sur l'aspect 'distribution'.



(A : TRAVAIL, E : ENERGIE, Q : CHALEUR, S : ENTROPIE, T : TEMPERATURE)

**Figure 18.** Gedanken-experiment (expérience fictive) de négentropie dans une ville, qui illustre une économie fonctionnant sans consommation d'énergie. A gauche, la chaleur du soleil produit une différence de température des couches superficielles de la mer. La quantité de chaleur  $Q_2$  est prélevée de la couche supérieure de la mer à une température  $T_2$  et elle est utilisée dans la machine de Carnot, où une partie A est transformée en travail mécanique tandis qu'une partie  $Q_1$  est transmise aux couches marines profondes à une température  $T_1$ . Si le travail mécanique A est utilisé pour comprimer de l'air, ce dernier se réchauffe dans des conditions isothermes en cédant sa chaleur et la quantité d'énergie A est restituée à la couche superficielle de la mer d'où elle venait. Lorsque la bouteille d'air comprimé est transportée vers une ville, il est évident qu'il ne s'agit pas de transport d'énergie. L'énergie interne d'un gaz (idéal) dépend uniquement de la température et non de la pression et l'on suppose ici que la température  $T_2$  reste inchangée. En fait, dans la mer, seule la quantité de chaleur  $Q_1$  est passée de la température  $T_2$  à la température  $T_1$ , mais le potentiel énergétique de l'emplacement demeure le même. C'est l'entropie de cet emplacement marin qui a augmenté, phénomène connu sous le nom d'entropie de mélange. La même quantité d'entropie affectée d'un signe négatif, ou négentropie, a été transportée sous forme d'air comprimé vers des villes. Si les processus sont inversés, la négentropie créée est égale à la production d'entropie à l'emplacement considéré. Dans l'infrastructure urbaine, l'air a la possibilité de se détendre pour mettre en mouvement, par exemple, un véhicule. Après détente l'air se refroidit et l'atmosphère environnante fournit la quantité de chaleur A nécessaire au moteur. Lorsque le véhicule est en mouvement, la friction qui en résulte dégrade l'énergie mécanique A en chaleur frictionnelle A. Avec la dégradation de la qualité de l'énergie, la chaleur est restituée à l'atmosphère d'où elle provenait; et le potentiel énergétique de l'emplacement urbain demeure également inchangé. (Source: n° 10 de la bibliographie).

- DOUBLEMENT DE LA POPULATION ≈ 40 à 60 ANS
- DOUBLEMENT DE LA CROISSANCE ECONOMIQUE DE 5% 15 ANS
- MODIFICATION DU SCHEME D' "INFORMATION" UTILISE PLUS DE 50 ANS

**Figure 19.** Caractéristiques du facteur temps dans l'évolution de la demande d'énergie.

Les problèmes que pose la demande d'énergie sont aussi en partie des problèmes techniques, mais la variété et la pluralité des emplois de l'énergie et notamment la différence fondamentale qui existe entre l'utilisation de l'énergie et les services énergétiques débouchent sur des considérations mal définies que les lois scientifiques de conservation n'aideront pas à éclaircir. Même au niveau de la recherche fondamentale, il reste encore beaucoup à faire avant de bien comprendre ce qu'est la demande d'énergie.

Nous avons aussi vu que le potentiel d'amélioration du rendement, en matière d'utilisation de l'énergie, ne peut changer que lentement avec l'infrastructure sur laquelle elle repose. On peut à terme se montrer optimiste, mais il ne faut pas sous-estimer le facteur temps nécessaire aux améliorations qui demanderont probablement des générations.

La conclusion générale est qu'il faut faire preuve de beaucoup de prudence quand on parle de demande d'énergie. Ne pas utiliser l'énergie n'est pas le remède aux problèmes énergétiques d'une société. Seuls des changements de structure, qui impliquent une évolution de la société, de l'économie, de la technique et de la science permettant de déboucher sur le domaine abstrait, peuvent en la matière apporter du nouveau, et cela demande du temps, beaucoup de temps.

### Remerciements

L'auteur tient à remercier MM. C. Marchetti et W. Sassin qui, au cours de nombreuses discussions, lui ont apporté d'utiles suggestions.

### Bibliographie

- [1] Chapman, P., A Review of Methods and Applications, *OMEGA, The International Journal of Management Science*, 4, 1, 1976.
- [2] Charpentier, J.-P., et J.-M. Beaujean, Toward a Better Understanding of Energy Consumption – III, *Energy*, 2, p. 213–282, 1977.
- [3] Fisher, J.C., et Pry R.H., *A Simple Substitution Model of Technological Change*, Report 70-C-215, General Electric Company, Research and Development Center, Schenectady, N.Y., Technical Information Series, Juin 1970; voir aussi *Technological Forecasting and Social Change*, 3, 1971.
- [4] Georgescu, N.R., *The Entropy Law and the Economic Process*, Harvard University Press, 1971.
- [5] Häfele, W., et Sassin, W., *Applications of Nuclear Power Other Than for Electricity Generation*, RR-75-40, Institut international d'analyse appliquée des systèmes, Laxenburg (Autriche), 1975.
- [6] Häfele, W., Energy Systems, Global Options and Strategies, dans *Conférence IIAAS 1976*, Institut international d'analyse appliquée des systèmes, Laxenburg (Autriche), 10–13 mai, Vol.1, 1976.
- [7] Häfele, W., et al., *Second Status Report of the IIASA Project on Energy Systems 1975*, RR-76-1, Institut international d'analyse appliquée des systèmes, Laxenburg (Autriche), 1976.
- [8] Häfele, W., Die Bedeutung der Energie für den Lebensstandard, die wirtschaftliche Entwicklung und die Umwelt, in *Vorträge des Internationalen Kongresses Energie und Umwelt, vom 8.2. bis 10.2.1977 in Düsseldorf*, Vulkan-Verlag Essen (R.F.A.), 1977.
- [9] Hildebrandt, R., Schilling, H.-D. et Peters W., Der Verbrauch an Primärenergieträgern in der Welt, den USA und der Bundesrepublik Deutschland, *Reihe Rohstoffwirtschaft International*, Verlag Glückauf, Essen, à paraître.
- [10] Marchetti, C., Primary Substitution Models, document interne, Institut international d'analyse appliquée des systèmes, Laxenburg (Autriche), 1975.
- [11] Nordhaus, W.D., *The Demand for Energy: An International Perspective*, CP-76-1, Comptes rendus du Groupe de recherche sur la demande d'énergie, Institut international d'analyse appliquée des systèmes, Laxenburg (Autriche), 1976.
- [12] Schurr, S.H., et Darmstadter, J., Some Observations on Energy and Economic Growth, *Symposium on Future Strategies for Energy Development*, Oak Ridge, Tenn., 1977.
- [13] Slesser, M., *Energy Analysis in Technology Assessment*, Université de Strathclyde (Royaume-Uni), 1973.
- [14] Thoma, J., *Energy, Entropy and Information*, RM-77-32, Institut international d'analyse appliquée des systèmes, Laxenburg (Autriche), 1977.