

# Energie et analyse de systèmes

par le Professeur Wolf Häfele

## 1. INTRODUCTION

*Jusqu'à présent, la production, le transport et la distribution de l'énergie n'ont été envisagés généralement que de façon fragmentaire; dans le meilleur des cas, seuls des sous-systèmes ont été considérés. Aujourd'hui, l'énergie est utilisée à une échelle qui grandit rapidement et de ce fait les sociétés en dépendent de plus en plus. Ce fort accroissement en quantité influe sur la plupart des aspects qualitatifs de l'utilisation de l'énergie.*

*Le Professeur Häfele est Directeur de l'Institut für Angewandte Systemtechnik und Reaktorphysik, au Kernforschungszentrum Karlsruhe\* (RFA). Il dirige aussi les travaux relatifs aux systèmes centrés sur l'énergie à l'Institut international d'analyse appliquée de systèmes à Laxenburg (Autriche) et il est membre du Comité consultatif scientifique de l'Agence. Nous avons retenu l'article du Professeur Häfele pour le Bulletin car il s'agit d'une monographie complète et unique sur le problème de l'énergie examiné sous l'angle de l'analyse de systèmes. L'AIEA collabore avec le groupe de l'IIASA que dirige le Professeur Häfele, à la recherche sur les systèmes centrés sur l'énergie.*

*\* Institut d'analyse de systèmes et de physique des réacteurs appliquées, au Centre d'études nucléaires de Karlsruhe.*

*Ressources, réserves, fiabilité et environnement sont parmi les mots-clefs qui peuvent caractériser le changement de nature du problème de l'utilisation de l'énergie. L'énergie ne peut plus être considérée comme posant un problème technique et économique isolé; elle s'intègre dans l'écosphère et dans le complexe société-technologie. Il faut tenir compte de contraintes et de conditions aux limites avec autant d'attention que dans la solution de problèmes techniques traditionnels, comme celui d'une turbine à vapeur, par exemple. Il en résulte un degré élevé d'interdépendance. Par ailleurs, l'objectif de la production d'énergie devient plus évident: il s'agit d'assurer la survie d'un monde civilisé et surpeuplé sur un globe aux dimensions finies. En raison de cette interdépendance et de ce fini, il semble que l'énergie doive être considérée dans le cadre d'un système et c'est pourquoi nous employons l'expression «systèmes centrés sur l'énergie». La production d'énergie n'est que l'un des éléments d'un tel système; son exploitation et son intégration dans le complexe social et global du point de vue de l'écologie, de l'économie, des risques et des ressources sont tout aussi importantes.*

*La méthode consistant à aborder le problème de l'énergie sous l'angle de l'analyse de systèmes mérite davantage d'explications. L'auteur se propose, dans le présent article, de définir brièvement les questions fondamentales et espère qu'il contribuera, ce faisant, à faire mieux comprendre les opinions très diverses et à dissiper certains malentendus que fait naître l'énergie. Le malentendu naît dès l'abord de l'emploi de l'expression «crise de l'énergie». Y a-t-il ou non une crise de l'énergie? Il y a beaucoup à faire pour étudier le problème de l'énergie sous cet angle. Le présent article ne peut apporter qu'une contribution marginale à cet égard. L'auteur espère toutefois qu'il permettra de mieux comprendre l'importance de la tâche.*

## 2. LES DIVERSES PHASES DU PROBLEME DE L'ENERGIE

Il importe de se rendre compte que le problème de l'énergie présente, semble-t-il, diverses phases échelonnées dans le temps. Les caractéristiques du problème seront très différentes et parfois même opposées selon la phase considérée.

Il convient de distinguer les trois phases ci-après:

Le court terme,	1970 - 1985
Le moyen terme,	1980 - 1995
Le long terme,	1990 - 2050 (?)

Les intervalles ci-dessus ne sont qu'approximatifs, les chevauchements de phases empêchant toute délimitation très nette. Les explications ci-après permettront de définir ces phases et peut-être de justifier les distinctions établies (figure 1).

Fig. 1 Les diverses phases du problème de l'énergie			
Court terme 1970 - 1985	Moyen terme 1980 - 1995	Long terme 1990 - 2050 (?)	Avenir plus lointain
Prix de l'énergie	Nouvelles techniques d'utilisation du charbon	Surgénérateurs rapides	En outre
Importation de pétrole	Réacteurs à eau légère en grand nombre	Hydrogène	Utilisation de l'énergie solaire à grande échelle
Sécurité des approvisionnements	Réacteur à haute température refroidi par un gaz	Transport de grandes quantités d'énergie	
Conservation	Gazoducs	Réacteur à haute température refroidi par un gaz	
Investissements	Plate-formes flottantes	Parcs nucléaires	
Choix des sites	Chauffage des locaux par l'énergie solaire	Optimisation du point de vue de l'intégration de l'énergie dans l'environnement	
	Prospection	Contrôle mondial	
	Lutte contre la pollution à grande échelle		

### 2 a) Le court terme (1970 - 1985)

Pendant la première phase, le marché des combustibles connaîtra certaines pénuries et transformations, notamment en ce qui concerne le pétrole et le gaz. Les progrès techniques pourront faciliter l'adaptation nécessaire à la situation. Mais cette adaptation exigera un certain délai, probablement dix à quinze ans. C'est précisément ce délai qui détermine la durée de la première phase car on ne pourra, alors, avoir recours qu'à l'appareil technique et économique existant.

Pendant cette première phase, de toute évidence le problème essentiel sera celui des **approvisionnements en pétrole et en gaz**, en particulier aux Etats-Unis. Considérons par exemple le problème de la recherche de pétrole. Selon M. K. Hubbert [1] la quantité de pétrole découverte par mètre de forage, aux Etats-Unis, diminue nettement depuis 1938 et n'est aujourd'hui que de 12 barils par mètre. Par ailleurs, Hubbert admet que le pétrole découvert depuis les origines jusqu'en 1965 représente environ 82% de l'ensemble des réserves que l'on peut espérer découvrir. Du point de vue qualitatif, la situation est analogue pour le gaz, mais il n'en est pas de même pour le charbon. Pour diverses raisons, le charbon ne peut pas être utilisé aisément [2]. On ne peut guère espérer découvrir facilement de nouvelles ressources de pétrole et de gaz. Il faudrait pour cela investir d'énormes capitaux.

**La conservation de l'énergie** sera donc une des préoccupations essentielles dans les années à venir. L'attention se portera sur l'augmentation du rendement de conversion, sur la réduction du gaspillage, sur l'amélioration de l'isolation thermique des locaux à usage de bureaux et d'habitation et diverses autres mesures. Tous les pays devront donc revoir leurs prévisions relatives à la demande d'énergie compte tenu de ces mesures de conservation, en particulier les Etats-Unis [3] qui passeront d'une période d'abondance à une période de conservation de l'énergie. Ailleurs, le changement sera moins radical mais il s'imposera également.

Les mesures de conservation ne pourront que réduire la gravité de pénurie de pétrole et de gaz mais non pas les éliminer. A court terme, les Etats-Unis n'ont pas d'autre choix que d'**importer** les quantités de pétrole nécessaires du Moyen-Orient qui possède environ 50% de toutes les ressources en pétrole du monde non compris l'URSS et la Chine. Il ne faut pas oublier toutefois que le Moyen-Orient fournit au Japon 80% et à l'Europe occidentale 60% de leurs approvisionnements en pétrole. Les conséquences de cet état de choses sont exposées en détail par exemple par Walter Levy [4, 5].

L'électricité sera de plus en plus fournie par l'**énergie d'origine nucléaire** mais dans des proportions qui resteront limitées car le délai nécessaire pour construire une centrale nucléaire augmente régulièrement. Aux Etats-Unis, on compte souvent huit à neuf ans. En outre, il ne faut pas oublier que toute l'énergie électrique ne constitue que 25% de la demande d'énergie primaire et 10% seulement de la demande d'énergie secondaire. A court terme, l'énergie d'origine nucléaire, tout en jouant un rôle important, influera donc moins sur la solution du problème général de l'énergie qu'on ne le pensait jusqu'à présent.

Il existe de nombreuses **règlementations** en ce qui concerne l'utilisation de l'énergie, les importations, les impôts et taxes et les tarifs. Très souvent elles sont élaborées de façon fragmentaire. Il y a eu parfois sous-optimisation lorsque l'énergie n'était pas encore considérée de façon globale. Les contingents d'importation de pétrole aux Etats-Unis en sont un exemple. De même, ce n'est qu'aujourd'hui que la République fédérale d'Allemagne s'efforce d'élaborer un plan d'ensemble en vue de résoudre de façon globale le problème de l'énergie. En outre, on voit apparaître de plus en plus de règlements relatifs à la protection de l'environnement, et l'industrie nucléaire a contribué dans une certaine mesure à faire prendre conscience des problèmes de l'environnement. Certes, elle n'a joué en la matière qu'un rôle d'initiateur, les problèmes qui se rapportent à l'environnement ayant un caractère beaucoup plus général; toutefois, les difficultés que l'action de groupes de pression en faveur de l'environnement crée aux autorités chargées de délivrer les autorisations de construire des centrales nucléaires aggravent encore les problèmes de la production d'électricité en quantité suffisante. De même, les règlements très stricts qui concernent l'émission d'agents polluants par les moteurs à combustion entraînent un accroissement de la consommation d'essence. Il sera

donc probablement indispensable de revoir les règlements existants dans le cadre global de l'analyse de systèmes.

Certains pensent qu'à l'heure actuelle on est exagérément sensible aux problèmes de l'environnement, notamment en ce qui concerne l'emplacement des grandes installations industrielles telles que centrales, ports de déchargement pour pétroliers géants, raffineries, lignes haute tension, etc. Il est à penser qu'au cours des dix années à venir un certain **équilibre s'établira entre les exigences de la protection de l'environnement et les exigences économiques**. L'établissement d'un équilibre raisonnable sera probablement l'une des caractéristiques de la première phase.

De même, un équilibre s'établira entre les prix de l'énergie et l'ensemble de l'économie de la prochaine décennie. La construction de nouvelles raffineries et autres installations, la recherche intensive de combustibles fossiles répondant aux normes en matière d'environnement, les études et réalisations dans la technologie de l'énergie et divers autres éléments entraîneront une hausse des prix de l'énergie. Reste à savoir à quel niveau cet équilibre s'établira.

De nombreuses études ont été publiées récemment sur ces questions. Un article de S.O.D. Bechtel [6], notamment, aide à faire les distinctions nécessaires qui seront mentionnées dans le présent article.

## **2 b) Le moyen terme (1980 - 1995)**

Ainsi que nous l'avons déjà dit, la technologie peut aider la société à s'adapter à des conditions et contraintes nouvelles dans le domaine de l'énergie. Le délai nécessaire pour cette adaptation fixe le début de la deuxième phase ou du moyen terme: c'est la phase pendant laquelle les ajustements technologiques se feront sentir. Si l'on veut déterminer grosso modo où ces ajustements doivent se faire, il importe de se rendre compte que, dans la pratique, la consommation d'énergie se répartit en quatre parts égales: 25% de la demande d'énergie primaire émanent des locaux à usage d'habitation et de commerce, 25% de l'industrie, 25% des transports et 25% est la demande d'énergie primaire pour la production d'électricité. En raison du mauvais rendement de la conversion, les derniers 25% ne représentent que 10% de l'ensemble de la demande d'énergie secondaire. L'énergie nucléaire a été développée presque exclusivement en vue de la production d'électricité. Même si le nucléaire s'empare de la majorité des centrales (ce qui sera probablement le cas), la production d'énergie en quantité suffisante sera encore un problème pendant cette phase car il n'est pas absolument certain qu'une économie entièrement électrifiée soit une solution possible. Il semble évident, par exemple, que les avions ne pourront pas voler à l'électricité. Les combustibles fossiles continueront de jouer un rôle important et il en existe heureusement beaucoup sous forme de charbon. L'exploitation du charbon n'a pas augmenté ou a même diminué dans le passé. Cela est dû en grande partie aux méthodes actuelles d'extraction mais le relèvement des normes et l'amélioration des règlements de sécurité, de même que l'insuffisance de la recherche ont également accru les difficultés que les houillères ont éprouvées au cours des dix dernières années [2]. Les progrès techniques dont il a été question ci-dessus permettent probablement d'aborder le problème de l'utilisation du charbon par d'autres moyens que les méthodes classiques d'extraction, les procédés les plus probables étant la liquéfaction et la gazéification suivies du transport par pipe-lines [7]. Ces procédés permettront de passer facilement de la consommation de gaz naturel à celle de son produit de remplacement. Pour gazéifier le charbon il faut produire de la chaleur industrielle. Il est donc intéressant de déterminer la puissance installée nucléaire nécessaire pour fournir la chaleur requise. Cela pourrait amener à pousser la mise au point du réacteur à haute température refroidi par un gaz.

Le problème du choix des sites des réacteurs nucléaires pourrait aussi faire l'objet d'importants progrès techniques. Il convient de mentionner ici le projet de production en série de centrales nucléaires qui seraient construites sur des plates-formes flottantes. Cette méthode permettrait à la fois une construction plus économique et un contrôle très strict de la qualité et réduirait les difficultés de plus en plus grandes qui sont liées au choix des sites des centrales nucléaires et autres installations techniques dans des régions très peuplées. Mais d'autres tendances dans l'évolution du problème général de l'emplacement des installations doivent aussi être envisagées. Un autre objectif des études et réalisations pourrait être des mesures visant à réduire l'emploi des combustibles fossiles. Il y a lieu de mentionner aussi les applications particulières de l'énergie solaire et notamment le chauffage des locaux dans certaines régions des pays tempérés. L'énergie solaire est déjà utilisée à cette fin actuellement.

Mais l'adaptation profonde de l'économie et des infrastructures des sociétés modernes à la troisième phase du problème de l'énergie, au long terme, revêt une importance plus grande. Les ressources en combustibles fossiles étant limitées, il faudra, à long terme, se préparer à exploiter une ou deux des rares possibilités qui s'offrent aujourd'hui de se procurer de l'énergie en quantités quasi illimitées. Ceci exigera probablement certaines adaptations. Il faudra peut-être, par exemple, modifier la ligne actuelle de démarcation entre la forme électrique et la forme non électrique sous lesquelles l'énergie est utilisée ou considérer de façon plus explicite les liens entre l'énergie et l'eau disponibles. Des adaptations de ce genre auront des conséquences très importantes.

## **2 c) Le long terme (1990 - 2050 (?))**

Les principales caractéristiques de la troisième phase du problème de l'énergie pourraient être les suivantes:

- Une ou deux des rares possibilités actuelles de se procurer de l'énergie en quantités quasi illimitées sont déterminées et font l'objet d'études approfondies afin de pouvoir être mises en œuvre à l'échelle industrielle.
- La demande globale d'énergie décuple – au minimum. Les pays en voie de développement sont parmi ceux où la consommation d'énergie augmente le plus.
- Les limites et contraintes de l'utilisation globale de l'énergie sont déterminées et des modes de production et d'utilisation de l'énergie compatibles avec ces limites et contraintes sont mis au point.
- La deuxième phase du problème de l'énergie a été mise à profit pour ménager la transition vers cette troisième phase.

Ces caractéristiques comptent plus que la date de 1991. L'expérience révèle qu'il est souvent plus difficile de prévoir les dates que les caractéristiques d'une évolution.

On trouvera ci-après plus de détails sur les possibilités mentionnées ci-dessus de se procurer de l'énergie en quantités quasi illimitées ainsi que sur les contraintes et limites de l'utilisation globale de ces quantités d'énergie. Il convient d'étudier le long terme de façon plus approfondie car la phase intermédiaire doit constituer une transition permettant d'aboutir progressivement à cette dernière phase. Nous allons donc examiner de façon plus précise certains aspects plus particuliers des systèmes centrés sur l'énergie ainsi que les possibilités, contraintes et limites existant en matière d'utilisation de l'énergie à grande échelle, puis nous reviendrons à l'étude du long terme.

## **3. ETABLISSEMENT DE MODELES POUR L'OFFRE ET LA DEMANDE D'ENERGIE**

Auparavant c'était en grande partie la demande d'énergie qui était le moteur du progrès de la technologie énergétique et de l'évolution d'une économie énergétique. Les autres

considérations étaient reléguées au second plan et il était donc possible de retenir des formes hautement agrégatives de paramètres dans le domaine de l'énergie, par exemple l'augmentation de la demande d'électricité. Ce que peu de gens ignorent sans doute, c'est que la demande d'électricité double tous les dix ans. Ces considérations ont été également très utiles car ces agrégations permettaient d'obtenir des résultats d'une bonne précision. Les variations des composants de ces agrégats tendaient à s'annuler les unes les autres.

On se trouve maintenant dans une situation qui évolue. A court terme, les réserves ne pourront plus satisfaire aussi facilement la demande de certains types de combustibles. Des considérations écologiques et d'autres contraintes, comme on l'a déjà indiqué, entrent aussi en ligne de compte et on ne peut plus les reléguer au second plan. Il est donc impératif de procéder à des évaluations plus détaillées de paramètres moins agrégatifs et par conséquent d'établir des modèles mathématiques pour la demande et l'offre d'énergie.

Il paraît possible de retenir trois aspects de cette opération: détermination du problème, optimisation et prévision.

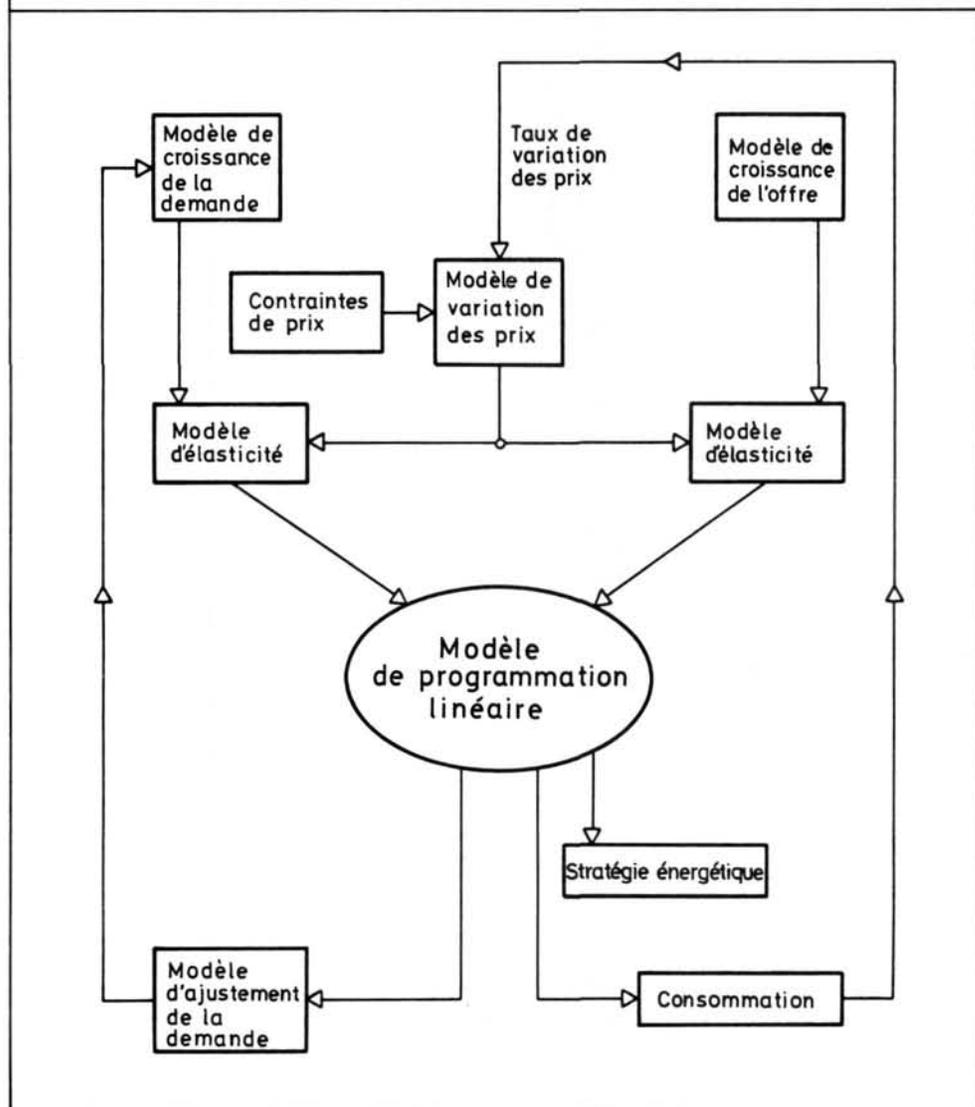
Plusieurs choses sont à déterminer dans l'établissement de modèles. On a déjà dit que les réglementations dans le domaine énergétique ont été élaborées de façon fragmentaire: seuls des sous-systèmes ont été envisagés. La méthode des modèles devrait conduire à une perspective plus vaste: que se passerait-il si . . . ? Il devrait de la sorte être possible d'évaluer certaines mesures et réglementations, en particulier lorsqu'il s'agit de concilier les exigences de la protection de l'environnement et les exigences économiques, comme on l'a dit plus haut. En outre, la méthode permet de faire entrer en ligne de compte le problème complexe de l'évaluation de la technologie, et de dresser ainsi un ordre de priorité pour les études et réalisations. Sans aucun doute, la communauté scientifique et technologique se préoccupe de la production d'énergie, mais l'utilisation de l'énergie et son intégration dans l'environnement est un problème qui deviendra de plus en plus urgent à long terme. L'établissement de modèles mathématiques permettrait de le cerner plus clairement. Puis, l'influence de la conservation de l'énergie pourrait être plus justement appréciée dans le contexte d'une croissance économique limitée ou d'une croissance nulle.

L'optimisation est l'objectif évident d'un modèle mathématique. La répartition la meilleure et la plus régulière du combustible, la substitution optimale d'un combustible à un autre et l'apport optimal de capital entrent en ligne de compte. Jusqu'à présent, on obtenait la fonction des objectifs tout simplement par l'étude économique des prix et des coûts exprimés en termes monétaires. Il faudra désormais incorporer des objectifs multiples dans cette fonction, pour tenir compte non seulement des valeurs économiques mais aussi de l'environnement et des valeurs sociales. On arrive alors au problème plus général de la comparaison de ces valeurs et on dit parfois que cela revient à comparer des pommes à des oranges. De toute évidence, il faudra ici un travail plus méthodique.

La prévision est le troisième aspect et nous ne l'expliquerons pas très en détail car son importance est largement admise. Par la suite, nous parlerons des «problèmes de systèmes». Aussi ferons-nous observer que la prévision de ces «problèmes de systèmes» présente un intérêt particulier si l'on veut comprendre les systèmes centrés sur l'énergie. Un exemple typique pour l'établissement de modèles mathématiques de la demande et de l'offre d'énergie a été présenté à une récente conférence du MIT par Schweizer, Love et Chiles [8]. Ces auteurs examinent un modèle de répartition des combustibles comme celui qui est décrit au tableau 2. Un modèle mathématique de la demande d'énergie et de la croissance de cette demande pour divers types de combustible dans différentes régions et secteurs du marché a été utilisé. Le modèle de la demande est combiné à un modèle

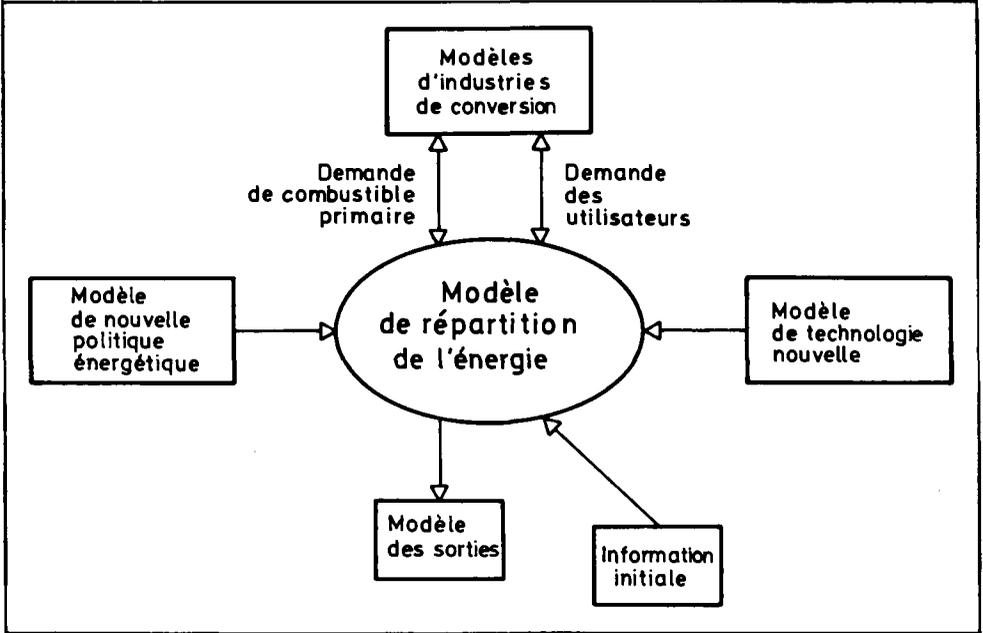
Fig. 2 Modèle de répartition de l'énergie

(d'après Schweizer, Love, Chiles, Westinghouse Electric Corporation)



des différentes élasticités partielles pour servir d'entrée pour un algorithme de répartition dans le cadre d'une programmation linéaire. On agit de même pour un modèle de l'offre, de la croissance et de l'élasticité de l'offre. L'algorithme de programmation linéaire répartit la croissance de la demande selon la croissance de l'offre pour une fonction donnée des objectifs. On parvient ainsi à une stratégie de l'énergie qui permet de faire face à la croissance de la demande avec des variations de prix concomitantes. Une telle solution implique une certaine interchangeabilité des combustibles. Cela conduit au domaine de la conversion des énergies et aux modèles propres à ce domaine. Il faut alors prendre en

**Fig. 3 Energie - modèle d'ordinateur**  
 (d'après Schweizer, Love, Chiles, Westinghouse Electric Corporation)



**Tableau 1** Modèle dynamique de répartition de l'énergie

$$\delta P = \sum_{ik} \delta P_{ik}$$

$\delta P_{ik} \equiv$  Augmentation des prix du  $k^{\text{ème}}$  combustible payés par la  $i^{\text{ème}}$  industrie

$$\delta D_i = \sum_k d_{ik} \cdot \delta P_{ik} = \sum_k \beta_{ik} \cdot \frac{D_{ik}}{P_{ik}} \cdot \delta P_{ik}$$

$\delta D_i \equiv$  Augmentation de la consommation totale minimale de la  $i^{\text{ème}}$  industrie

$$\beta_{ik} = \frac{\delta D_{ik}}{D_{ik}} / \frac{\delta P_{ik}}{P_{ik}} \equiv \text{Elasticité partielle (obtenue d'après les modèles d'élasticité)}$$

$$\delta S_k = \sum_i s_{ik} \cdot \delta P_{ik} = \sum_i \gamma_{ik} \cdot \frac{S_{ik}}{P_{ik}} \cdot \delta P_{ik}$$

$\delta S_k \equiv$  Augmentation de l'offre totale maximale du  $k^{\text{ème}}$  combustible disponible

$$\gamma_{ik} = \frac{\delta S_{ik}}{S_{ik}} / \frac{\delta P_{ik}}{P_{ik}} \equiv \text{Elasticité partielle (obtenue d'après les modèles d'élasticité)}$$

$$P'_{ik} = P_{ik} - g_{ik} \cdot P_{ik} \equiv \text{Coût de la fourniture du } k^{\text{ème}} \text{ combustible à la } i^{\text{ème}} \text{ industrie}$$

**Problème de programmation linéaire:** Minimiser l'augmentation des prix totaux  $\delta P$  en fonction des variables  $\delta P_{ik}$  et des contraintes  $D_i$  et  $S_k$ .

**Note:** Le critère d'optimisation pourrait être différent (par ex. Augmentation de la pollution); Des contraintes supplémentaires pourraient être considérées (par ex. Ressources).

considération les technologies nouvelles mais aussi des modèles pour les politiques énergétiques que l'on envisage de mettre en œuvre. Le modèle général tel qu'il est décrit à la figure 3 permet de déterminer l'ordre de priorité des études et réalisations, en vue d'évaluer les conséquences qui se produiraient si l'on considérait des fonctions d'objectifs autres que le prix minimal, et ces fonctions permettent d'apprécier les incidences de certaines mesures.

On trouvera un bref exposé des études mathématiques que suppose ce modèle dans le tableau 1.

L'étude d'un tel modèle et ses applications numériques aident à mieux comprendre les caractères propres de la réalité à laquelle ce modèle s'applique. Il peut être particulièrement important de déterminer les divers niveaux éventuels du système considéré et le degré d'association entre ces niveaux. Par exemple, une nouvelle centrale fait partie d'un système qui est le réseau de distribution d'électricité d'une région donnée. Ce réseau à son tour fait partie d'un système plus vaste qui est le réseau général de distribution de toutes les formes d'énergie et ainsi de suite. Il peut être intéressant de voir par exemple si une modification des limites d'un tel système a une influence sur les conclusions que l'on peut tirer en d'autres termes; le degré d'association du système considéré et des systèmes de niveaux supérieurs [9].

Une remarque doit être faite sur l'entrée de données. Les modèles mathématiques n'ont d'intérêt que si l'on a les données d'entrée nécessaires. Les évaluations pour la solution asymptotique du problème de l'énergie exigent que l'on tienne compte de considérations globales. Le type de donnée nécessaire à cet effet doit être déterminé. Le problème est alors de rendre compatible le degré d'agrégation des données brutes. En outre, les données requises peuvent être disponibles pour ce qui est de l'économie mais d'une égale importance sont les données concernant la pollution, les rejets thermiques, les données sociologiques ou, en d'autres termes, les données qui permettent d'établir les fonctions d'objectifs plus générales qui ont été mentionnées plus haut.

#### 4. LA DEMANDE D'ENERGIE A LONG TERME

Dans ce qui suit nous jonglerons avec des grandes quantités d'énergie. Il est donc utile de poser  $Q = 10^{18}$  BTU. Le tableau 2 donne l'équivalent de  $Q$  en plusieurs unités.

Tableau 2	Unités d'énergie-équivalences
	$1 Q \equiv 10^{18} \text{ BTU} = 2,52 \times 10^{17} \text{ kcal}$
	$= 1,05 \times 10^{21} \text{ joule}$
	$= 2,93 \times 10^{14} \text{ kWh (th)}$
	$= 1,22 \times 10^{10} \text{ MWj (th)}$
	$= 3,35 \times 10^7 \text{ MWan (th)}$

Tableau 3	Consommation d'énergie	
Etats-Unis	1970	0,07 Q/a
Etats-Unis	2000	0,16 Q/a
Monde	1970	0,24 Q/a (4x10 <sup>9</sup> habitants, 2kW(th) par habitant)
Monde	2000	2,1 Q/a (7x10 <sup>9</sup> habitants, 10kW(th) par habitant)
Monde	2050	6 Q/a (10x10 <sup>9</sup> habitants, 20 kW(th) par habitant)

Le tableau 3 fournit quelques chiffres relatifs à la consommation d'énergie. Il est à noter qu'en 1970 la consommation mondiale d'énergie était d'environ 1/4 Q par an alors qu'elle pourrait être de 6 Q par an, c'est-à-dire 25 fois plus importante, en 2050. Le chiffre de  $10^{10}$  pour la population n'est qu'une hypothèse très grossière et peut être violemment contesté. Il faut toutefois souligner que ce chiffre ne suppose pas une croissance exponentielle. En revanche, un chiffre-clé est celui de 20 kW par habitant, avancé par

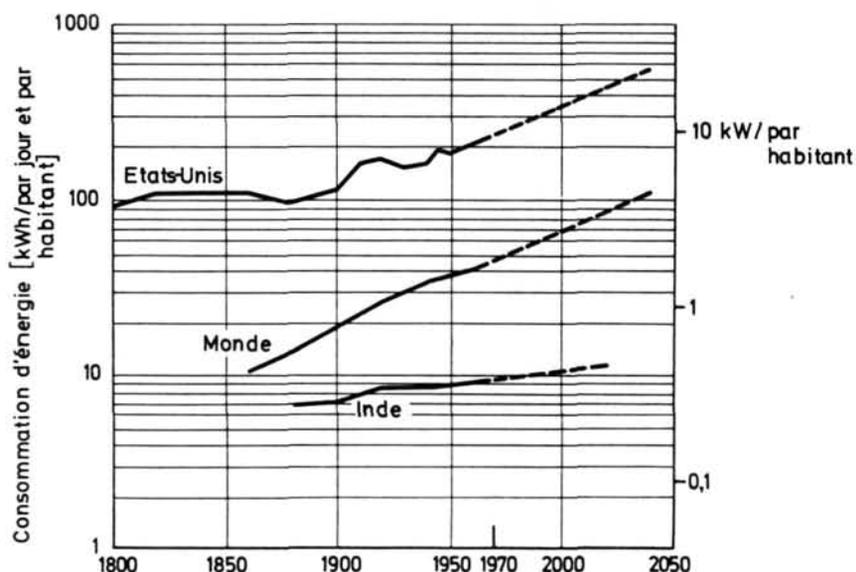
**Tableau 4 Bilan énergétique pour une culture à l'état stationnaire\***

	kW (th) / habitant
Niveau actuel aux Etats-Unis	10,0
Ajustement pour l'avenir	
Sidérurgie et métallurgie de l'aluminium et du magnésium	0,1
Récupération et recyclage d'éléments rares	2,0
Hydrogène électrolytique	2,5
Eau dessalée (400 l / jour)	0,3
Transport de l'eau vers les villes	0,1
Climatisation de l'air des villes	0,3
Production intensive d'aliments	0,2
Traitement des eaux usées et des déchets	0,5
<b>Total des ajustements</b>	<b>6,0</b>
<b>Imprévus</b>	<b>4,0</b>
	<u><b>20,0</b></u>
* (Weinberg, Hammond, <i>Conséquences sur le plan mondial de l'augmentation de l'utilisation de l'énergie</i> , Genève, septembre 1971.)	

Weinberg et Hammond [10] après une étude assez approfondie des conditions dans lesquelles vivra une société civilisée. Le tableau 4 donne les divers éléments de ce chiffre. Là encore, il est à noter que les nombres de kW par habitant ne supposent pas non plus une croissance exponentielle. Ce qu'il y a lieu de souligner ici, c'est que nous devons considérer les conditions de vie au cours des futures décennies: la population sera nombreuse et il sera probablement indispensable de recycler les ressources, en particulier l'eau. Pour mieux comprendre quelles seront les conditions de vie futures, il faudrait avoir recours aux méthodes de la psychosociologie, mais poursuivons notre raisonnement. La figure 4 [11] montre qu'actuellement l'utilisation de l'énergie est très inégalement répartie dans le monde. En revanche toute étude de solutions asymptotiques du problème de l'énergie doit se fonder sur les hypothèses que la quantité d'énergie fournie par habitant sera la même dans le monde entier et que cette quantité sera égale au chiffre le plus élevé que nous puissions

Fig. 4 Croissance de la demande d'énergie

Source: Ch. Starr [11]



considérer, par exemple le chiffre relatif aux États-Unis. Il est impossible de garantir la non-prolifération des installations de grande puissance pour un nombre d'habitants donné. En fin de compte, le même degré de confort doit être accessible à toute la population mondiale, du moins potentiellement, ce qui signifie que toute solution asymptotique du problème de l'énergie doit se fonder sur l'hypothèse de l'égalité. Sur la base de ces seules considérations, on peut penser que la demande d'énergie sera alors beaucoup plus importante — dix fois au moins mais probablement plus — qu'aujourd'hui.

Dans un chapitre précédent, nous avons indiqué quelles seraient, dans le temps, les trois phases du problème de l'énergie. La troisième phase, c'est-à-dire le long terme, est caractérisée par le fait que l'on aura déterminé une ou deux des rares possibilités de se procurer du combustible en quantités quasi illimitées; il ne sera plus possible, alors, d'utiliser les combustibles fossiles à grande échelle. Comme nous verrons au chapitre suivant, tel sera le cas lorsque la consommation d'énergie atteindra quelques Q par an. Le moment où cela se produira dépendra dans une large mesure du chiffre de la population mondiale et de la vitesse à laquelle les pays en voie de développement rattrapent le niveau de vie des autres pays. Ceci peut aussi bien se produire avant qu'après 1995 et, par conséquent, on atteindra avant ou après cette date la troisième phase mentionnée ci-dessus. La date de 1995 n'a donc été donnée qu'à titre indicatif.

La figure 5 montre l'intérêt de ces considérations. Elle fait apparaître une relation linéaire entre la consommation d'énergie par habitant et le produit national brut par habitant, et l'on constate que cette relation se maintient si l'on évalue les augmentations récentes de ces chiffres. On se demande aujourd'hui dans quelle mesure cette linéarité s'impose

comme une nécessité et, là encore, on s'aperçoit qu'il faut établir des modèles mathématiques. Il y a beaucoup à faire dans ce domaine.

Il convient ici de faire encore une remarque. La relation linéaire qui apparaît à la figure 5 semble mettre en évidence le système simple que l'on indique à la figure 6. Le cercle de l'offre de combustible et des niveaux de prix définit une contrainte mais, en dehors de cela, seuls apparaissent l'énergie et le produit national brut. Ce système était raisonnable tant que les contraintes et conditions aux limites précédemment mentionnées n'avaient qu'une importance secondaire. Il n'en est plus de même aujourd'hui.

Fig. 5 Quantité d'énergie vendue aux utilisateurs et produit national brut

- 1968 d'après l'Annuaire statistique de l'ONU (1970)
- (1961/1962) d'après Ch. Starr  
Energy and Power, 1971 S.4

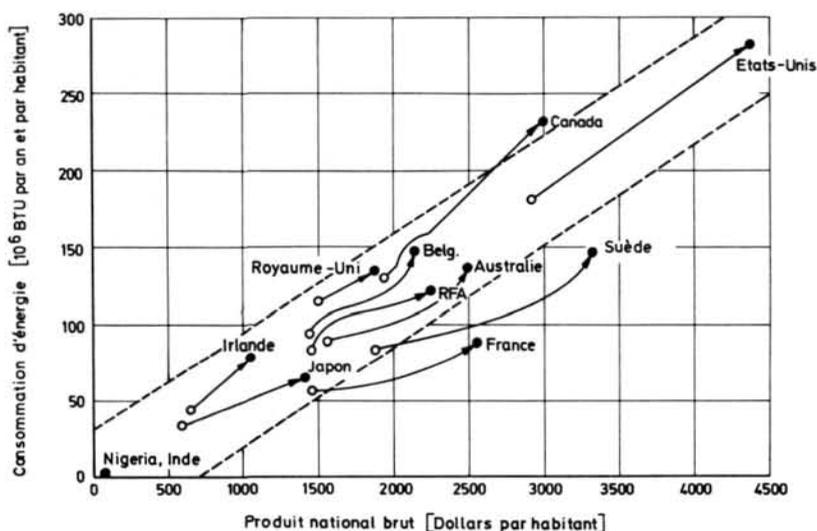
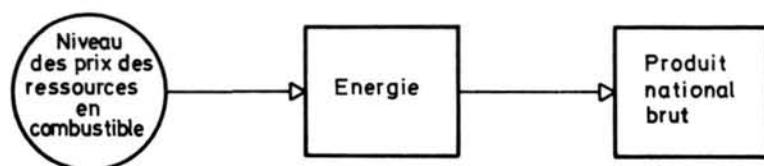


Fig. 6 Système centré sur l'énergie - schéma simple



## 5. RESSOURCES ENERGETIQUES

Le combustible exclusivement utilisé jusqu'à présent est le combustible fossile. En vue de l'avenir nous devons comparer les ressources en combustible fossile à d'autres ressources.

### 5 a) Combustibles fossiles

Les chiffres que l'on cite aujourd'hui à propos des ressources en combustibles fossiles diffèrent considérablement. Ces différences s'expliquent par le simple fait qu'il est difficile de déterminer nettement la limite en dessous de laquelle les gisements ne peuvent plus être considérés comme des ressources. Earl Cook [12] fait observer qu'il y a trois méthodes de prévision des ressources disponibles. La première est la méthode économique qui consiste en une simple extrapolation des tendances du passé et des élasticités de la demande ainsi que des tendances de la technique et aboutit à la simple conclusion que si l'on cherche du combustible dans telle ou telle condition on le trouvera. C'était peut-être une méthode acceptable à une époque où l'échelle de production de l'énergie était peu importante dans le contexte global. L'ordre de grandeur du problème de l'énergie tel que nous le considérons ici est tout à fait différent. La seconde méthode est celle des analogies géologiques; elle est orientée vers l'offre, à l'inverse de la méthode économique qui est orientée vers la demande. Les extrapolations sont fondées sur des études géologiques. La troisième méthode, de M.K. Hubbert [13], est celle de l'historique de l'exploitation; elle tient compte de la courbe de la production passée, de la courbe des réserves prouvées et de la courbe des découvertes par unité de longueur de forage. Ces deux dernières méthodes peuvent être retenues aux fins de la présente étude.

Le tableau 5 présente les chiffres fournis par V.E. McKelvey et D.C. Duncan [14] et par M.K. Hubbert [13]. La grande différence entre la limite inférieure et la limite supérieure

Tableau 5 Valeur énergétique des réserves mondiales de combustibles fossiles (Unité: Q= 10 <sup>18</sup> BTU)				
	Selon V.E. Mc Kelvey et D.C. Duncan [12]		Selon M.K. Hubberts [13]	
	Réserves certaines	Réserves probables et marginales	Réserves possibles	%
Charbon	17,3	320	192	88,8
Pétrole brut	1,73	23	11,1	5,2
Gaz naturel	1,95	20	10,1	4,7
Autres hydrocarbures liquides	0,21	3,2		
Sables bitumeux	0,23	6,3	1,7	0,8
Huile de schiste	0,87	77	1,1	0,5
<b>Total</b>	<b>22,5 Q</b>	<b>450 Q</b>	<b>216 Q</b>	

des chiffres de McKelvey-Duncan et les chiffres de M.K. Hubbert qui se situent entre ces limites, confirment les observations ci-dessus. Il convient de souligner une fois de plus que les valeurs supérieures ne sont pas des limites dans le sens matériel du terme. Pour le charbon, par exemple, les chiffres ne se rapportent qu'aux ressources situées à moins de 1800 mètres de profondeur.

La valeur énergétique des ressources en pétrole se situe entre 2 Q et 20 Q. Comme nous l'avons indiqué dans le chapitre précédent, il faut s'attendre à une consommation de quelques Q par an dans un avenir relativement proche. Les chiffres donnés au tableau 5 montrent donc que la demande ne pourra pas être satisfaite à l'aide du seul pétrole et qu'il faudra avoir recours au charbon. Les ressources en charbon sont de l'ordre de dix fois plus importantes que les ressources en pétrole. Il est donc certainement raisonnable de considérer le charbon comme une pierre angulaire possible de la production d'énergie pour le moyen terme. Un calcul algébrique simple montrerait que le charbon peut durer quelques dizaines d'années. Mais il faut tenir compte des conditions dans lesquelles se ferait l'extraction de quantités massives de charbon, extraction qui exigerait d'importantes opérations à l'échelle mondiale. On se heurte alors, comme nous le verrons, aux problèmes de systèmes: les effets accessoires qui étaient secondaires lorsque les quantités extraites étaient modestes prendront une très grande importance. A titre d'exemple, on peut mentionner les problèmes relatifs à l'extraction à ciel ouvert. Des observations analogues sont aussi valables pour l'huile de schiste.

Il y a beaucoup à faire pour cerner ces problèmes de systèmes. Il ne suffit pas de considérer un chiffre de ressources unique et pas tellement élevé. La période pendant laquelle il sera possible de compter sur le charbon pourrait donc bien être plus courte. Cela confirme l'observation selon laquelle le moyen terme serait avant tout une phase de transition sans heurts.

## **5 b) Ressources en uranium et en thorium**

Les observations relatives à la difficulté d'évaluer correctement les ressources en combustibles fossiles s'appliquent aux ressources en combustibles pour réacteurs à fission, à savoir l'uranium et le thorium. On a beaucoup publié sur ce sujet et, au milieu de la précédente décennie, la question des réserves d'uranium a fait l'objet de nombreuses discussions [16]. Il convient toutefois de se rappeler qu'à cette époque tous les chiffres se rapportaient à des gisements connus ou à des gisements dont on pouvait prédire la découverte avec suffisamment de certitude. En outre, on n'a considéré que l'uranium dont le prix était inférieur ou égal à 30 dollars la livre de  $U_3O_8$ . Pour bien se rendre compte de ce que cela signifie, il faut connaître la relation entre le prix du combustible ou du minerai et le coût du kWh aux bornes pour divers types de centrales. Cette relation est indiquée au tableau 6. Lorsque le prix du minerai passe de 10 à 30 dollars la livre, cette hausse se traduit, dans le cas d'un réacteur à eau légère, par une augmentation de 0,1 cent du coût du kWh aux bornes. Ces considérations délimitaient le cadre des discussions au cours de la précédente décennie. A cette époque la considération essentielle était celle de la concurrence entre l'énergie d'origine nucléaire et l'énergie d'origine fossile. Dans le contexte d'aujourd'hui et notamment du présent article, ceci n'est plus la seule considération valable. En conséquence, le tableau 7 donne aussi des estimations fondées sur des prix plus élevés de l'uranium. A 100 dollars la livre, l'augmentation du coût du kWh produit par des réacteurs à eau légère serait d'environ 0,5 cent et les ressources ne seraient encore que de quelques centaines de Q. Cette quantité est comparable à celle des ressources fossiles. Considéré sous l'angle des ressources en combustibles, le problème de l'énergie est le même pour les centrales nucléaires actuelles et pour les centrales classiques. Du point de vue qualitatif, la situation est différente pour le réacteur surgénérateur. Son importance à court terme tient au fait que l'augmentation du prix du minerai

**Tableau 6 Variations du prix du combustible / minerai et coût de l'électricité aux bornes**

Combustible fossile	0,5	( à $\approx \frac{50 \text{ cent}}{\text{million BTU}}$ )
Réacteur à eau légère	0,1	} ( à $\approx 10 \$$ par livre de $U_3O_8$ )
Réacteur surgénérateur	0,001	

**Tableau 7 Ressources en uranium**

(Unité  $Q \approx 10^{18}$  BTU)

(Sauf indication contraire, les chiffres sont tirés de V.E. McKelvey et D.E. Duncan [12], ou sont compatibles avec ceux qui sont donnés par ces auteurs)

	Gisements connus		Ressources non découvertes et non évaluées		
	b) Réacteur à eau légère	c) Réacteur surgénérateur	b) Réacteur à eau légère	c) Réacteur surgénérateur	
jusqu'à 10 \$ la livre de $U_3O_8$	a) 0,7	70	d) $\approx 30$	d) $\approx 3000$	a) Valeurs en dollars à la fin de la précédente décennie b) en prenant comme facteur de conversion: une tonne courte de $U_3O_8 = 7 \times 10^{11}$ BTU c) en prenant comme facteur de conversion: une tonne courte (1 tonne courte = 907 kg) = $7 \times 10^{13}$ BTU d) cfr. note d), tableau 4 dans [14] e) n'est pas nécessairement compatible avec [14] f) en prenant un facteur de $3 \times 10^{-2}$ pour l'extraction g) on a estimé que le coût de l'uranium extrait de la mer serait de 25 dollars par livre de $U_3O_8$ [15]
jusqu'à 100 \$ la livre de $U_3O_8$	a) —	—	e) $(2-10) \times 10^2$	e) $(2-10) \times 10^4$	
jusqu'à 500 \$ la livre de $U_3O_8$	a) —	—	d) $5 \times 10^4$	d) $5 \times 10^6$	
Océans	g) $1 \times 10^2$	f) $1 \times 10^4$	$3 \times 10^3$	$3 \times 10^5$	

d'uranium n'influe à peu près pas sur le coût du kWh aux bornes d'une centrale équipée d'un réacteur surgénérateur. Des cours de plus de 500 dollars la livre de  $U_3O_8$  demeurent acceptables. D'énormes réserves deviennent alors accessibles et leur rendement énergétique est cent fois meilleur. Le tableau 7 montre que les ressources énergétiques rendues accessibles par l'emploi du réacteur surgénérateur sont quasi illimitées — c'est pourquoi ce réacteur est important à long terme. M.K. Hubbert [13] cite l'exemple d'un gisement d'uranium que la technologie des surgénérateurs rend très intéressant: les schistes de Chattanooga, qui s'étendent tout au long de la limite occidentale des Appalaches, aux Etats-Unis. Ces schistes comprennent une strate riche en uranium de 5 m d'épaisseur et d'une teneur de 60 g par tonne. Cette teneur est très inférieure à celle du minerai utilisable dans les conditions actuelles. La valeur énergétique de ces schistes par mètre carré serait l'équivalent de celle de 2000 tonnes de charbon; la valeur énergétique d'une surface de 13 kilomètres carrés serait l'équivalent de celle des ressources mondiales de pétrole brut ( $2 \times 10^{12}$  barils).

La répartition du thorium à travers le globe est différente de celle de l'uranium, ce qui a des conséquences importantes sur le plan régional. Ainsi, par exemple, l'Inde ne possède pas beaucoup d'uranium mais elle a de grandes quantités de thorium. Elle doit donc s'efforcer de trouver les moyens d'utiliser ses ressources. Mais, dans l'ensemble, l'équivalent en énergie des ressources de thorium est à peine supérieur à celui des ressources d'uranium; on ne se trompe pas de beaucoup si l'on admet qu'ils sont égaux. Pour plus de détails, le lecteur se reportera à McKelvey et Duncan [14]. La fission de l'uranium et du thorium dans des réacteurs surgénérateurs offre donc la première possibilité de se procurer de l'énergie en quantités quasi illimitées.

Il est à noter que la mise au point du réacteur surgénérateur à neutrons rapides est très avancée. Le modèle le plus étudié est celui qui est refroidi par un métal liquide. Il est étudié par l'URSS, la France, le Royaume-Uni, l'Allemagne en collaboration avec la Belgique et les Pays-Bas, les Etats-Unis et le Japon. Les réalisations à grande échelle comme celle du réacteur surgénérateur rapide doivent franchir trois seuils:

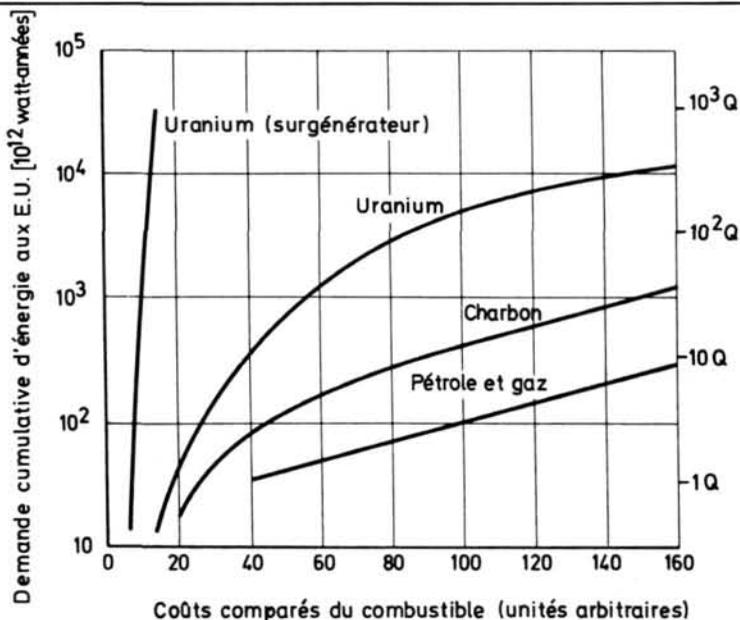
- le seuil de la factibilité scientifique,
- le seuil de la factibilité industrielle,
- le seuil de la factibilité commerciale.

Actuellement, des réacteurs prototypes industriels de 300 MWe sont construits ou mis en service par l'URSS, la France, le Royaume-Uni, l'Allemagne en collaboration avec la Belgique et les Pays-Bas, les Etats-Unis et le Japon.

Le second seuil, celui de la factibilité industrielle, a donc été franchi. On devrait atteindre

Fig. 7 Coûts comparés du combustible

Source : Ch. Starr [11]



celui de la factibilité commerciale au milieu de la prochaine décennie [17]. En outre, le réacteur surgénérateur rapide refroidi par un métal liquide a des solutions de rechange. Le réacteur surgénérateur rapide refroidi à l'hélium en est une. Certains problèmes clés relatifs à ce type de réacteur sont actuellement à l'étude. Mais le surgénérateur thermique [18], notamment le surgénérateur à sels fondus étudié par l'Oak Ridge National Laboratory (Etats-Unis) est une autre solution de rechange. Le point qui est à noter ici est le suivant: grâce à la technologie de la présente décennie et de la prochaine, le réacteur surgénérateur rapide nous offre, sur le plan industriel, la possibilité de nous procurer des quantités quasi illimitées d'énergie, même s'il faut envisager, dans un avenir relativement proche, une consommation d'énergie de quelques Q par an. La figure 7 récapitule la situation pour les combustibles fossiles et pour les réacteurs à fission [11] et montre que l'on ne peut pas se contenter de considérer un chiffre unique en ce qui concerne les ressources énergétiques.

### 5 c) Ressources en lithium et en deutérium

L'énergie d'origine nucléaire peut être produite non seulement par fission mais aussi par fusion. On sait que les réacteurs à fusion n'ont pas encore franchi le seuil de la factibilité scientifique mais il n'est pas impossible qu'ils le fassent dans les dix ou quinze années à venir. Quelle que soit la manière dont les différents seuils de factibilité seront franchis, il est utile de jeter un coup d'œil sur les ressources en combustibles. Le système de fusion de loin le plus probable est la réaction D-T. Celle-ci exige, outre le deutérium, du lithium comme combustible. Or, en matière d'approvisionnement en combustible, le lithium est le facteur limitatif. En fait, ce réacteur est un surgénérateur à fusion [19] car le lithium est transformé en tritium de la même façon que U-238 l'est en Pu-239 dans un surgénérateur à fission. Si l'on envisage un réacteur à fusion, on a constaté que l'on pouvait produire 1 MWj par gramme de lithium naturel (7,4% Li-6 et 92,6% Li-7) [20]. Cette quantité est la même que pour l'uranium ou le thorium dans les réacteurs à fission.

Ici encore nous avons pour le lithium des chiffres peu élevés [14], ce qui est incontestablement dû au fait que jusqu'à présent rien n'incitait à entreprendre sérieusement la prospection. Mais la quantité de lithium présente dans les seuls océans est un indice intéressant: elle est de  $2,7 \times 10^{11}$  tonnes, ce qui donnerait  $2,2 \times 10^7$  Q, s'il était possible d'extraire tout ce lithium. Si l'on admet un facteur de  $\sim 3 \times 10^{-2}$  pour l'extraction, on obtient  $\sim 7 \times 10^5$  Q.

La situation serait tout à fait différente avec un réacteur à fusion fondé sur la réaction D-D, qui n'exige pas de lithium. Toutefois, il ne faut pas se leurrer sur la difficulté de réaliser un tel réacteur à fusion, comme nous l'avons dit, il n'est même pas certain qu'il soit réalisable. Quoi qu'il en soit, la quantité de deutérium présente dans les mers est équivalente à  $\sim 10^{10}$  Q ou, si l'on emploie, pour l'extraction, le facteur  $3 \times 10^{-2}$ , l'équivalent de  $3 \times 10^8$  Q.

Il est évident que la fusion serait une seconde possibilité de se procurer de l'énergie en quantités quasi illimitées, si cette solution était techniquement réalisable.

### 5 d) Sources géothermiques

L'utilisation de sources géothermiques pour la production d'énergie à grande échelle est une conception relativement nouvelle. Jusqu'à présent on n'a exploité de centrales géothermiques qu'aux Etats-Unis, en Italie et en Nouvelle-Zélande. L'échelle de production est modeste, au maximum quelques centaines de MW. La durée de vie probable de ces centrales est de l'ordre de quelque dizaines d'années [13]. Cette possibilité a donc été plutôt négligée lorsque la question de la production d'énergie à grande échelle a été examinée.

Mais récemment elle a été évoquée à nouveau. Donald E. White [21] estime que finalement la capacité géothermique, sur 10 km de profondeur, serait approximativement pour le monde entier de  $4 \times 10^{20}$  Wsec, soit 0,4 Q, abstraction faite de tout facteur de conversion ou autre. Il est évident que c'est là une quantité négligeable dans le contexte qui nous intéresse.

Toutefois, les opinions diffèrent à ce sujet. Récemment, R.W. Dose [22] a prétendu que si l'on voulait exploiter de façon plus rigoureuse les sources géothermiques existant aux Etats-Unis, on pourrait explorer des sources dont la durée serait de plus mille ans et la puissance de  $10^5$  MW, ce qui correspondrait à 3 Q aux Etats-Unis, soit une quantité comparable, en gros, à celles des ressources américaines en pétrole. Aucun détail n'est donné sur ces évaluations.

On aboutit à un tout autre ordre de grandeur quand on considère le contenu thermique de la croûte terrestre. Le gradient de température est de l'ordre de quelques dizaines de degrés C par kilomètre de profondeur. Si l'on considère la croûte terrestre, sous les continents, jusqu'à une profondeur de 10 kilomètres, le contenu thermique est de l'ordre de  $5 \times 10^5$  Q. Il faut tenir compte des pertes de conversion et du fait que seule une fraction de la croûte terrestre sous les continents peut être exploitée. En principe, on doit pouvoir disposer ainsi de quelques milliers de Q. Ce n'est là toutefois qu'une évaluation rapide et approximative.

Les considérations sur l'énergie géothermique ne s'arrêtent pas là: il ne faut pas oublier les mers. Jusqu'à 200 mètres de profondeur, la température de l'eau est supérieure d'environ  $10^\circ\text{C}$  à celle des eaux plus profondes. Si l'on considère la surface totale des mers, on arrive au chiffre de 3000 Q environ. Mais, ici, les pertes de conversion seraient considérables du fait que la différence de température n'est que de  $10^\circ\text{C}$  et, par ailleurs, on ne pourrait exploiter qu'une partie des mers. On devrait en principe obtenir quelques douzaines de Q de cette façon.

La question de savoir si l'énergie géothermique est exploitable à une grande échelle reste entièrement ouverte. On ne peut ici tirer aucune conclusion ni, par conséquent, affirmer qu'il existe dans ce domaine une possibilité de production d'énergie à grande échelle.

### 5 e) Houille blanche et énergie des marées

La houille blanche et l'énergie des marées représentent quelques dixièmes de Q [13]. Ces sources d'énergie peuvent donc avoir un intérêt sur le plan régional mais n'offrent certainement pas la possibilité de produire de l'énergie à grande échelle.

### 5 f) Energie solaire

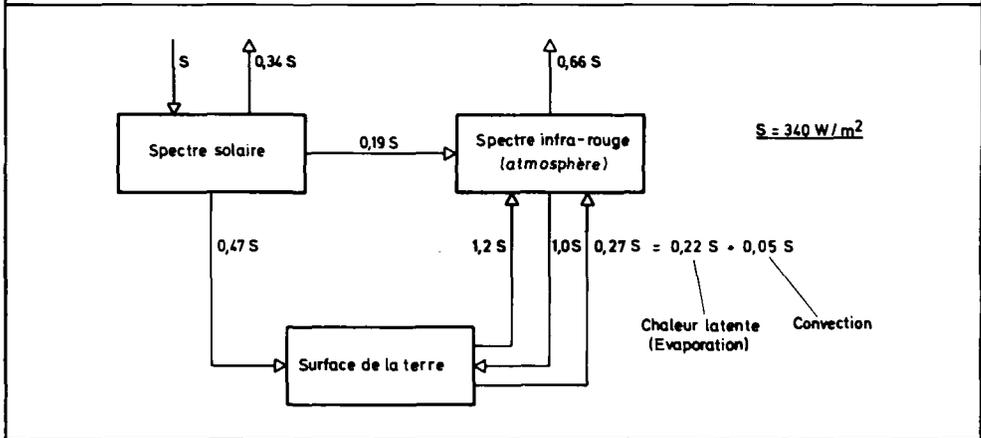
Le soleil fournit de l'énergie en quantité infinie. Le problème qui se pose est plutôt un problème de densité. L'apport d'énergie solaire au dessus de l'atmosphère est, en moyenne, pour le jour et la nuit et pour toutes les régions du globe, de  $340 \text{ W/m}^2$ . Environ 47% de cette énergie, soit  $160 \text{ W/m}^2$ , atteint la surface de la terre. La valeur nette du rayonnement infra-rouge émis est de  $70 \text{ W/m}^2$ . Nous avons donc

$$160 \text{ W/m}^2 = 70 \text{ W/m}^2 + 90 \text{ W/m}^2$$

lumière visible = rayonnement infra-rouge + chaleur.

La figure 8 donne plus de détails sur le bilan énergétique. La chaleur entretient le cycle de l'eau, réchauffe le sol et les couches inférieures de l'atmosphère et fournit l'énergie nécessaire aux processus biologiques.

Fig. 8 Répartition de l'apport d'énergie solaire



La considération déterminante en ce qui concerne la domestication de l'énergie solaire sur la surface de la terre est évidemment la question de savoir dans quelle mesure le bilan énergétique peut être modifié. C'est là naturellement un problème extrêmement complexe susceptible d'être étudié par l'analyse de systèmes, et nous reviendrons sur cette question. Selon une estimation très rapide, la quantité totale d'énergie solaire qui pourrait être recueillie dans le monde serait de  $20 \text{ W/m}^2$ . Il est à noter toutefois que, pour certaines régions, on peut admettre des valeurs beaucoup plus élevées. A l'échelon régional, l'énergie solaire peut donc jouer un rôle important. Mais ce qui nous intéresse ici, c'est la question de la production mondiale d'énergie à grande échelle. Le chiffre de  $20 \text{ W/m}^2$  montre clairement, comme nous le verrons plus tard, que le facteur déterminant, en ce qui concerne la domestication de l'énergie solaire à la surface du globe, n'est pas l'énergie disponible mais l'utilisation du sol, c'est-à-dire l'aménagement du territoire.

Toutefois, rien n'oblige à recueillir l'énergie solaire à la surface de la terre, on pourrait la recueillir dans l'espace extraterrestre. Dans une proposition récente, P.E. Glaser en dit plus long sur ce sujet [23, 24].

Il est donc évident qu'en principe l'énergie solaire peut offrir une possibilité de production d'énergie à grande échelle.

De ce qui précède, nous pouvons conclure qu'en principe du moins, trois (peut-être quatre) possibilités de production d'énergie à grande échelle nous sont offertes. Par production à grande échelle nous entendons la production de quelques Q par an pendant au moins mille ans. Ces possibilités sont les suivantes:

- 1) Energie obtenue par fission nucléaire
- 2) Energie obtenue par fusion nucléaire
- 3) Energie solaire
- 4) Energie provenant de sources géothermiques (?)

Il est à noter que la seule possibilité certainement réalisable est celle de la production d'énergie par fission. Les autres sources d'énergie telles que les combustibles fossiles, la houille blanche, les marées, etc. n'entrent pas dans cette catégorie; elle peuvent néanmoins avoir de l'importance sur le plan local.

## 6. PROBLEMES DE SYSTEMES

Si finalement il y avait plusieurs possibilités de se procurer de l'énergie en quantités quasi illimitées, quel serait le problème? La figure 6 donnerait à penser qu'il n'y en a pas.

L'énergie de fission est la seule possibilité qui soit déjà réalisable aujourd'hui. Mieux, la puissance nucléaire installée croît si rapidement que l'influence de l'énergie d'origine nucléaire commence à se faire sentir dans le contexte général de l'énergie. Nombre de pays pensent pouvoir produire suffisamment d'énergie d'origine nucléaire à la fin de la présente décennie pour couvrir environ 30% de leurs besoins d'électricité. Aux Etats-Unis, les centrales actuellement en service, en construction ou faisant l'objet d'une commande ferme, représentent déjà plus de 150 GW(e). Le chiffre correspondant est de 13 GW(e) pour la République fédérale d'Allemagne, de 15 GW(e) pour le Japon et de 254 GW(e) pour l'ensemble du monde. Mais il ne faut pas penser pour autant qu'il est facile aujourd'hui d'être un promoteur de construction de centrales nucléaires. L'énergie d'origine nucléaire soulève beaucoup d'objections dont les principales sont les suivantes:

- a) Le fonctionnement des centrales nucléaires comporte une certaine radioexposition des personnes.
- b) Cette radioexposition pourrait prendre des proportions très importantes en cas d'accident grave dans une centrale nucléaire. A cet égard on vise particulièrement le problème des systèmes de refroidissement du cœur en cas d'urgence.
- c) L'exploitation des centrales nucléaires pose le problème de l'élimination à long terme des déchets radioactifs.
- d) La manipulation de quantités importantes de plutonium dans le cycle du combustible entraînera inévitablement des pertes de plutonium dans la biosphère.
- e) Les matières fissiles sont potentiellement dangereuses car elles peuvent être utilisées à des fins militaires et il faut prévoir les risques de détournement illégal de ces matières par des individus ou des groupements.
- f) Les rejets thermiques des grandes centrales nucléaires sont importants et modifient la biosphère en réchauffant les cours d'eau et les lacs.
- g) Les centrales nucléaires occupent de grandes surfaces de sol.
- h) Nous n'avons pas besoin d'énergie d'origine nucléaire.

Il y a quelques années, l'objection portait sur les centrales nucléaires isolées. Aujourd'hui on aurait plutôt tendance à mettre en place et à exploiter des parcs nucléaires comprenant tout le cycle du combustible. Combien d'expéditions d'éléments de combustible irradié seront-elles nécessaires? Que penser des effets cumulés des divers rejets? Et, en principe, du plutonium?

Dans une certaine mesure il est légitime de se poser ces questions. Elles ont été posées et ont reçu une réponse alors que l'énergie nucléaire n'en était qu'à ses débuts. Aujourd'hui, l'énergie d'origine nucléaire s'est développée et il faut y revenir. Toutefois, ceci ne veut pas dire qu'il faille considérer comme légitimes toutes les objections soulevées contre l'énergie d'origine nucléaire [25].

Considérons par exemple la question de la radioexposition due au fonctionnement des centrales nucléaires. Aux Etats-Unis, le débat Gofman-Tamplin est étroitement lié à cette question. Compte tenu d'autres éléments, ce débat a permis de fixer, pour le débit d'équivalent de dose admissible une norme très faible qui est de 5 mrem par an (réacteur à eau légère).

Mais la question fondamentale est la suivante: quelles sont les autres solutions possibles? Dans une publication récente, les centres de recherche nucléaire de Karlsruhe et de Juliers (République fédérale d'Allemagne) se sont efforcés de comparer les différentes solutions [26]. Ils ont supposé que l'énergie électrique consommée par la République

Tableau 8 Pollution en République Fédérale d'Allemagne selon la source de l'énergie électrique produite (1970)  
d'après ref. [26]

	SO <sub>2</sub>	Poussières	NO <sub>x</sub>	Fluor	Xe	Kr	Total*
Anthracite	0,94	0,45	0,17	0,75	—	—	2,31
Lignite	1,20	0,86	0,28	1,65	—	—	3,99
Pétrole	1,16	0,22	0,20	0,06	—	—	1,64
Gaz naturel	3,1 x 10 <sup>-4</sup>	—	0,16	—	—	—	0,16
Réacteur à eau bouillante	—	—	—	—	1 x 10 <sup>-3</sup>	1 x 10 <sup>-3</sup>	2 x 10 <sup>-3</sup>
Réacteur à eau sous pression	—	—	—	—	3 x 10 <sup>-4</sup>	1,4 x 10 <sup>-3</sup>	1,7 x 10 <sup>-3</sup>

\* Pour la pollution résultant exclusivement de la production d'énergie électrique

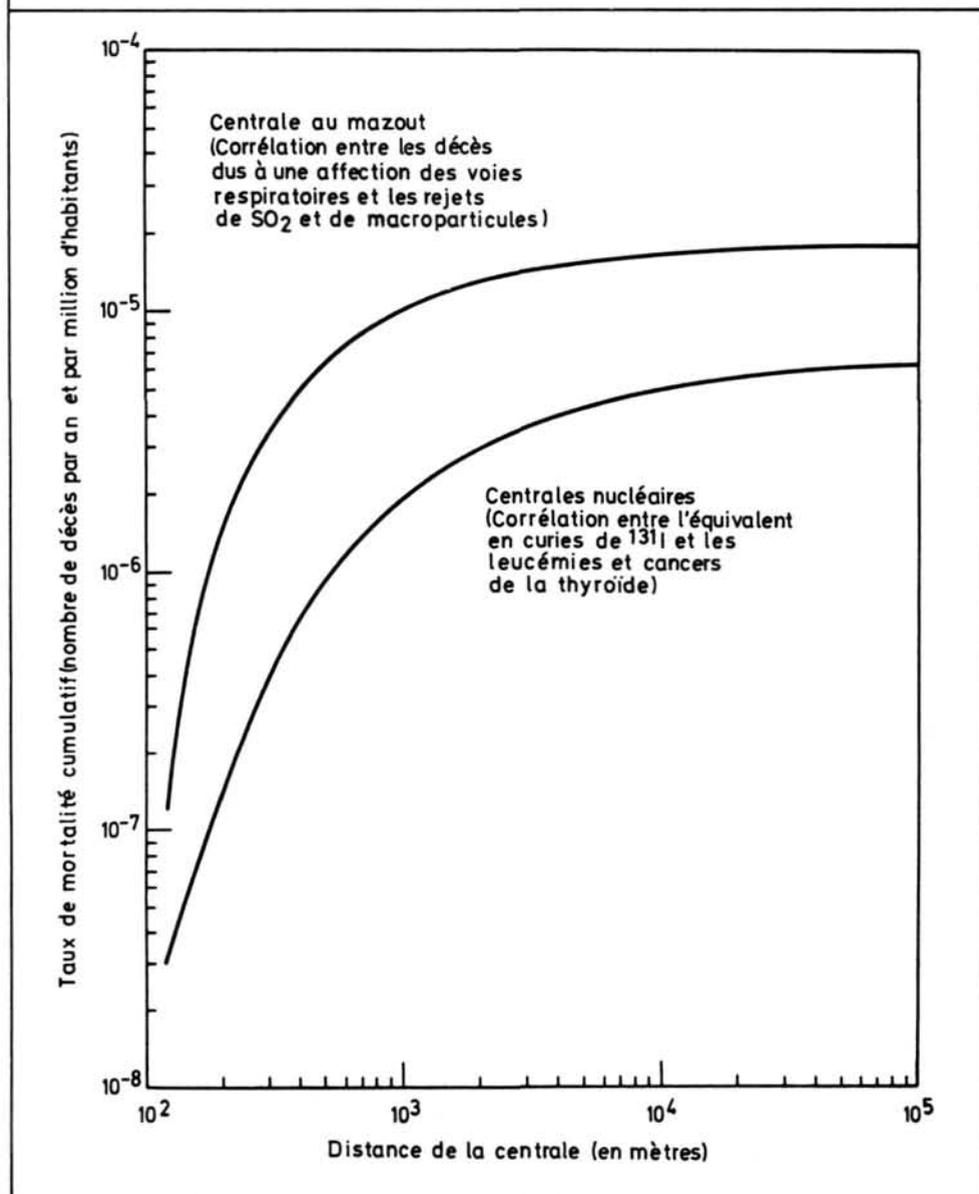
fédérale serait intégralement produite soit par du charbon, soit par du lignite, soit par du gaz, soit par des réacteurs à eau sous pression ou à eau bouillante. Evidemment, la comparaison des dangers dus à SO<sub>2</sub> à ceux qui sont dus à la radioactivité pose un problème difficile. A cette fin, on a pris les normes existantes pour chacun des agents polluants possibles, et on a normalisé les valeurs des débits de dose ambiante (obtenues à l'aide d'un modèle météorologique assez sommaire, il faut le reconnaître), puis on a fait la somme des normes et des valeurs normalisées (voir tableau 8).

Une telle comparaison pose naturellement des problèmes de méthodologie. Ainsi par exemple, on n'a pas tenu compte des effets synergiques et il n'est pas absolument certain que les diverses normes aient été établies à l'aide de méthodes ayant toutes la même rigueur. Nous avons déjà évoqué le problème de «la comparaison des pommes et des oranges». C'est là un des problèmes-clés de l'analyse de systèmes.

Même en tenant compte de ces réserves, il semble assez évident que chacun des autres modes de production envisagés pollue davantage l'atmosphère que l'énergie nucléaire. Le problème de la pollution a donc un caractère beaucoup plus général. Il n'est pas lié spécifiquement à l'industrie nucléaire mais le public en a pris conscience lors de l'apparition de l'énergie d'origine nucléaire. Le vrai problème est celui de l'échelle de production d'énergie. On aborde là un domaine où l'expérience et les préoccupations sont sans précédent.

Considérons maintenant un deuxième exemple. Le risque d'accident nucléaire est excessivement faible mais il existe. Dans le passé, on ne tenait pas expressément compte de risques aussi faibles mais, après avoir considéré ce problème à propos de l'énergie d'origine nucléaire, on évalue également les risques liés aux autres sources d'énergie. Récemment, C. Starr, M.A. Greenfield et D.F. Hausknecht ont comparé les risques que présentent une centrale nucléaire et une centrale au mazout [27]. La figure 9 indique l'un des résultats de cette comparaison. Là encore des questions de méthodologie se posent du fait que l'on compare des éléments qualitativement différents. Mais ce qui importe

Fig. 9 Centrales nucléaires et centrales au mazout  
(d'après Ch. Starr et coll.)



ici ne sont pas les détails de cette comparaison, qui pourront changer dans un sens ou dans l'autre à mesure que la comparaison sera plus élaborée, c'est le fait que cette comparaison s'impose dans l'immédiat. La question des risques n'est pas non plus spécifiquement liée à l'énergie nucléaire; c'est aussi un problème général qui est aujourd'hui au premier plan des préoccupations en raison des dimensions de la production d'énergie.

Tableau 9

Combustibles fossiles



$$\begin{array}{c} \Downarrow \\ 1g C \longrightarrow 3,4 \times 10^4 \text{ Wsec} \end{array}$$

Combustibles nucléaires



$$\begin{array}{c} \Downarrow \\ 1g U \longrightarrow 1 \text{ MWj} = 8,6 \times 10^{10} \text{ Wsec} \\ (1g Li \longrightarrow 1 \text{ MWj}) \end{array}$$

$\frac{1g U (Li)}{1g C} \longrightarrow \frac{8,6 \times 10^{10} \text{ Wsec}}{3,4 \times 10^4 \text{ Wsec}} = 2,5 \times 10^6$
---

Combustibles fossiles

$$0,24 \text{ Q par an} \longrightarrow 2,5 \times 10^{20} \text{ Wsec par an}$$

$$\implies 5 \text{ ppm } CO_2 \text{ par an, en poids}$$

(non recyclé)

Combustibles nucléaires

$$0,24 \text{ Q par an} \longrightarrow 8 \times 10^6 \text{ MW}$$

$$\implies 8 \times 10^6 \cdot f \text{ Curies par an}$$

$10^8 \text{ sec}$	$10^{10} \text{ sec}$	$10^{11} \text{ sec}$
$f = 10^4$	10	1

Autre exemple: les déchets de la production d'énergie. On trouvera les données qui s'y rapportent au tableau 9. Dans le cas des combustibles fossiles, on ne considère pas la pollution ordinaire car on peut penser que les mesures nécessaires auront été prises à cet égard. Mais leur combustion produit des quantités de  $CO_2$  si importantes qu'elles sont nécessairement évacuées dans l'atmosphère. Au rythme actuel de la production

mondiale d'énergie, on aboutit ainsi à une augmentation de 5 ppm en poids par an. Si la production d'énergie devenait 25 fois plus importante, ce chiffre s'accroîtrait en conséquence. L'indication «non recyclé» du tableau 9 vise le fait que CO<sub>2</sub> atmosphérique est en équilibre dynamique avec CO<sub>2</sub> des océans et de la biosphère, et que les valeurs réelles sont donc environ deux fois moins élevées. Il faut considérer cette augmentation de CO<sub>2</sub> par rapport à la quantité de CO<sub>2</sub> naturel que contient l'atmosphère. En 1950, elle était de 450 ppm en poids. On craint vivement que l'augmentation de CO<sub>2</sub> ne réduise le rayonnement infra-rouge renvoyé de la Terre vers l'espace extra-atmosphérique en raison de l'effet de serre [28]. Actuellement cet effet est certainement faible mais on ne sait pas bien quelle augmentation de CO<sub>2</sub> atmosphérique serait acceptable. De nombreux travaux de recherche seront nécessaires dans ce domaine.

Mais l'énergie d'origine nucléaire aussi produit des déchets. En raison du facteur bien connu de  $2,5 \times 10^6$  (production d'énergie par gramme de combustible dans le cas de l'énergie d'origine nucléaire par rapport à l'énergie d'origine fossile) ces déchets ont un faible volume et peuvent être confinés alors que CO<sub>2</sub> ne peut pas l'être. Il faudra donc mettre au point un confinement qui soit fiable sur de très longues périodes — c'est un problème très grave. Mais la véritable question n'est pas de savoir si nous voulons ou non faire face à ce problème. Elle est dans l'alternative suivante: ou bien accepter une influence sur le climat (influence qu'il conviendra de mieux déterminer) ou résoudre le problème que posent à long terme les déchets d'un faible volume. Là encore il s'agit de comparer des inconvénients entièrement différents, tâche typique de l'analyse de systèmes qui vise à faire mieux comprendre les interdépendances.

Pour ce qui est des rejets thermiques, il est devenu évident, même hors des milieux spécialisés, qu'il s'agit d'un problème général de la production d'énergie. Ce problème se présente sous un double aspect: la conversion d'énergie s'accompagne parfois de pertes importantes et, en outre, toute l'énergie utile aboutit finalement à des rejets thermiques (exception faite pour la partie infime de cette énergie qui se transforme en énergie de liaison). Un chapitre entier de la présente étude sera consacré à ce problème. Nous verrons que c'était jusqu'à présent une question secondaire qui, du simple fait des dimensions de la production d'énergie, devient une question primordiale, peut-être même le facteur limitatif. Une fois produite à partir d'énergies de liaison, l'énergie ne disparaît plus (sauf la partie infime qui redevient énergie de liaison). Elle aboutit finalement à l'espace extra-atmosphérique par le canal du rayonnement infra-rouge et elle doit donc s'intégrer dans notre environnement de façon que la détérioration des conditions naturelles de la planète ne dépasse pas des limites acceptables. Il est évident que les travaux relatifs au problème de cette «acceptabilité» font partie intégrante de l'analyse de systèmes.

Le présent article n'a pas pour objectif d'aborder les problèmes de systèmes de toutes sortes que pose la production d'énergie. Nous ne prétendons pas non plus que seule la fission pose des problèmes de systèmes. La fusion par exemple en pose aussi [19]. Il faut s'attendre qu'il en soit de même pour l'énergie solaire ou l'énergie géothermique. Dans le cas de l'énergie géothermique, par exemple, il faut tenir compte des possibilités de tremblements de terre. L'étude des problèmes de systèmes est une tâche énorme qui exige de très nombreuses années de travail et il y aura beaucoup à faire au cours des quelques années à venir. L'idée maîtresse du présent article est la suivante: Nous nous rendons de mieux en mieux compte que l'énergie d'origine nucléaire a joué un rôle de pilote pour tous les systèmes de production d'énergie, en ce sens qu'elle a mis en évidence le fait qu'il existe des problèmes de systèmes dès l'instant où la production d'énergie prend des dimensions énormes. Les critères d'évaluation de ces dimensions ne sont pas encore suffisamment bien établis mais il est évident que la nature même et les conditions qui caractérisent un univers fini les imposent implicitement. Aujourd'hui, à l'inverse d'hier, les

critères à définir explicitement se rapportent plus à l'exploitation de l'énergie, à l'intégration de l'énergie dans l'environnement et aux problèmes de l'acceptabilité qu'au problème de la production d'énergie en tant que telle.

## 7. L'ANALYSE DE SYSTEMES APPLIQUEE AU PROBLEME DE L'ENERGIE

Il est maintenant plus facile de définir les tâches que comporte l'analyse de systèmes appliquée au problème de l'énergie. Une généralisation prudente permettrait peut-être de comprendre ensuite la nature des problèmes de systèmes autres que ceux des systèmes centrés sur l'énergie. Ces tâches sont les suivantes:

- a) Il faut cerner et comprendre tous les problèmes de systèmes inhérents aux diverses possibilités de production d'énergie à grande échelle. Ce sera un travail continu et probablement sans fin car les systèmes centrés sur l'énergie se compliquent toujours davantage. Cette tâche ne peut être accomplie au moyen d'un algorithme. C'est plutôt une affaire de technologie et de sociologie. Il faudra probablement étudier le mode de vie des générations futures à l'aide des méthodes de la psychosociologie pour la mener à bien. Il importera tout particulièrement de déterminer les diverses interdépendances qui deviennent importantes en raison de l'augmentation des dimensions de la production d'énergie. Cela implique des travaux spécialisés dans des disciplines données mais seulement dans la mesure nécessaire pour définir les questions relevant de telle ou telle discipline. Ensuite, il appartiendra aux spécialistes de diverses disciplines scientifiques de poursuivre l'étude des questions ainsi définies dans le cadre de l'analyse de systèmes.
- b) Dans le cas des systèmes centrés sur l'énergie, le problème de systèmes essentiel semble être non pas celui de la production de l'énergie, mais celui de son intégration dans l'environnement. Il en est ainsi en raison des fonctions de la planète. L'énergie doit être intégrée:
  - dans l'atmosphère
  - dans l'hydrosphère
  - dans l'écosphère
  - dans la biosphère
- c) Il faut ensuite identifier et évaluer les possibilités de produire de l'énergie à grande échelle. Ces possibilités semblent être les suivantes:
  - l'énergie obtenue par fission nucléaire
  - l'énergie obtenue par fusion nucléaire
  - l'énergie solaire
  - l'énergie géothermiqueLes problèmes de systèmes pour l'énergie produite par fission ont déjà été identifiés partiellement; il faudra faire de même pour les autres possibilités. Pour comparer les diverses possibilités, il faudra effectuer non seulement des analyses des coûts et des avantages, mais des analyses des coûts, des avantages et des risques de caractère spécifique aussi bien que général.
- d) Enfin, il faudra minimiser les problèmes de systèmes. Cette tâche pose de sérieux problèmes de méthodologie. A plusieurs reprises, nous avons évoqué la comparaison de pommes et des oranges. En termes plus savants, cette tâche pose le problème méthodologique des objectifs multiples et de la décision dans des conditions d'incertitude. Une telle analyse de systèmes doit suivre continuellement l'évolution sociologique et technologique des systèmes centrés sur l'énergie.

## 8. INTEGRATION DE L'ENERGIE DANS L'ATMOSPHERE

Dans ce qui précède nous avons insisté sur ce que l'on peut appeler l'intégration de l'énergie dans l'environnement et il nous semble donc utile de nous expliquer davantage. Considérons d'abord l'intégration de l'énergie dans l'atmosphère. A cette fin, il convient d'examiner la distribution de l'apport d'énergie solaire schématisée à la figure 8.

Cet apport est de 340 watts par mètre carré de la surface sphérique supérieure de l'atmosphère; il s'agit là d'une moyenne entre le jour et la nuit et entre toutes les régions du globe. Environ 34% de cette quantité sont immédiatement réfléchis, 19% sont absorbés et transformés en chaleur dans l'atmosphère et 47%, c'est-à-dire  $160 \text{ W/m}^2$ , atteignent la surface de la terre. Sur ce dernier pourcentage, 20% des  $340 \text{ W/m}^2$  constituent la différence entre le rayonnement infra-rouge émis et le rayonnement infra-rouge rétrodiffusé de l'atmosphère vers la surface de la terre. Une autre partie égale à 22% fait évaporer l'eau et entretient le cycle de l'eau. Du fait de cette évaporation, l'eau monte jusqu'aux couches moyennes de l'atmosphère, elle s'y condense et la chaleur de condensation se répand dans l'espace extra-atmosphérique. Enfin 5% réchauffent la couche inférieure de l'atmosphère. Toute la chaleur reçue par l'atmosphère finit par diffuser dans l'espace extra-atmosphérique et, ainsi, un équilibre s'établit entre l'apport d'énergie solaire et l'émission d'énergie thermique. La température de la terre et de l'atmosphère est telle que cet équilibre s'établit exactement. Nous avons donc une échelle de puissances surfaciques. Le tableau 10 présente sous une forme simple cette échelle de puissances surfaciques naturelles. Il est à noter que le chiffre de  $55 \text{ W/m}^2$  n'est pas une moyenne mondiale et qu'il se rapporte aux régions humides des continents.

Quelques remarques s'imposent:

- l'équilibre énergétique est délicat, il s'établit entre deux quantités importantes (l'une dans le spectre visible et l'autre dans le spectre infra-rouge). Il faut donc évaluer avec le plus grand soin les diverses influences qui s'exercent sur les mécanismes d'échange de l'énergie et notamment l'effet de l'augmentation de la concentration de  $\text{CO}_2$  dans l'atmosphère ou les variations des divers albedos à considérer;
- Le recyclage de l'eau par les mécanismes d'évaporation et de condensation est intimement lié à l'équilibre énergétique;
- Ces mécanismes naturels s'expriment en unités de puissance surfacique.

Tableau 10 Puissances surfaciques naturelles

Chaleur à la surface de la terre (moyenne)	$100 \text{ W/m}^2$
Chaleur latente des précipitations sur les continents	$55 \text{ W/m}^2$
Chaleur sensible pour $1^\circ\text{C}$ de l'eau de pluie sur les continents	$0,1 \text{ W/m}^2$
Vents, vagues, courants de convection et autres (monde entier)	$0,7 \text{ W/m}^2$
Photosynthèse	$0,075 \text{ W/m}^2$

**Tableau 11 Puissances surfaciques**

	<u>Consommation</u>	
	Aujourd'hui	Demain
Moyenne mondiale	$\frac{1,5 \text{ KW/hab.} \cdot 3,3 \times 10^9 \text{ hab.}}{1,48 \times 10^{14} \text{ m}^2} = 0,033 \text{ W/m}^2$	$\frac{20 \text{ KW/hab.} \cdot 10^{10} \text{ hab.}}{1,48 \times 10^{14} \text{ m}^2} = 1,35 \text{ W/m}^2$
R.F. d'Allemagne	$\frac{4 \text{ KW/hab.} \cdot 6 \times 10^7 \text{ hab.}}{2,5 \times 10^{11} \text{ m}^2} = 1 \text{ W/m}^2$	$\frac{20 \text{ KW/hab.} \cdot 6 \times 10^7 \text{ hab.}}{2,5 \times 10^{11} \text{ m}^2} = 5 \text{ W/m}^2$
Zone industrielle (Région de la Ruhr)	$\frac{18 \text{ KW/hab.} \cdot 6 \times 10^6 \text{ hab.}}{6,5 \times 10^9 \text{ m}^2} = 17 \text{ W/m}^2$	$\frac{100 \text{ KW/hab.} \cdot 10^8 \text{ hab.}}{10^{10} \text{ m}^2} = 1000 \text{ W/m}^2$
<u>Production</u>		
Grands parcs nucléaires 30000 MW <sub>(e)</sub> → 100000 MW <sub>(th)</sub>		
$\frac{7 \times 10^{10} \text{ W}_{(th)}(\text{rejets})}{3,5 \times 10^6 \text{ m}^2} = 20000 \text{ W/m}^2$		

Considérons maintenant, aux fins de comparaison, les puissances surfaciques artificielles. Le tableau 11 fournit des données à ce sujet. Aujourd'hui, la **moyenne mondiale** de la puissance surfacique artificielle est certainement trop faible pour créer un problème mais la situation se transforme entièrement si l'on considère la consommation moyenne de 20 kW par habitant pour une population de 10<sup>10</sup> habitants que nous avons mentionnée précédemment. Un chiffre de 1,35 W/m<sup>2</sup> pour les continents est déjà comparable à la moyenne mondiale de la puissance surfacique pour les vents, les vagues et les courants de convection et autres.

Mais on ne saurait se contenter de considérer les moyennes mondiales. L'activité de l'homme ne se répartit pas également sur la terre. Aujourd'hui déjà, en la République fédérale d'Allemagne, la moyenne est d'environ 1 W/m<sup>2</sup>. A l'avenir, il faudra tenir compte de régions hautement industrialisées pour lesquelles les valeurs se situeront entre 17 W/m<sup>2</sup> et plusieurs centaines de W/m<sup>2</sup>. La question de savoir s'il faut redouter, à ce niveau, des effets néfastes sur l'atmosphère et le climat est encore sans réponse; il est évident qu'il faut aborder le problème progressivement.

Le premier effet de telles puissances surfaciques artificielles pourrait s'exercer sur le régime du cycle de l'eau. Aujourd'hui déjà, il semble que le nombre des fortes précipitations dans les régions industrialisées ait varié. Or, les zones industrielles ne rejettent pas seulement de la chaleur mais aussi des macroparticules et des agents polluants; il faut donc considérer les effets de toutes les pollutions. Il s'agit d'un problème complexe. Si les zones industrielles s'étendent, les modifications du régime du cycle de l'eau pourraient bien ne pas avoir un caractère local.

Un deuxième effet des puissances surfaciques artificielles pourrait s'exercer sur des climats régionaux mais seules certaines moyennes climatiques seraient légèrement modifiées. Il faut se rappeler que l'équilibre atmosphérique peut fort bien être instable. On peut donc se demander s'il y a des régions du globe plus ou moins sensibles aux rejets thermiques. Les puissances surfaciques artificielles pourraient exercer un effet encore beaucoup plus grave sur le climat général de la planète. Elles pourraient entraîner une élévation de la température moyenne et il ne faut pas oublier que des variations de un à deux degrés centigrades ont déjà des conséquences importantes.

Ce sont là des questions très délicates. Leur étude nécessite l'établissement de modèles méthodologiques et climatologiques qui exigent de très gros ordinateurs et les données d'entrée sont également très importantes. Mais il y a encore beaucoup à faire pour connaître suffisamment la physique des équations non linéaires qui caractérisent l'atmosphère. Depuis quelques années, ces questions suscitent un intérêt croissant [28]. Il convient de citer tout particulièrement les noms de Budyko, Smagorinski, Manabe, Washington, Lamb, Fortak, Bryson, Kellogg, par exemple. L'Organisation météorologique mondiale et le Conseil international des unions scientifiques prévoient pour 1977 la Première expérience globale du Programme global de recherche sur l'atmosphère [29]. Il faudra développer les programmes d'observation dans les sciences climatiques. Dans ce domaine, le programme CLIMAP permet d'établir de cartes climatiques du passé et donne donc l'occasion de vérifier la capacité des grands programmes climatiques d'ordinateur.

Nous avons fait précédemment allusion aux problèmes de systèmes dans le cas de la domestication de l'énergie solaire à grande échelle. Les tableaux 10 et 11 montrent que les puissances surfaciques qui seront nécessaires au monde civilisé dans certaines zones industrialisées seront au moins égales aux puissances surfaciques naturelles. L'utilisation industrielle de l'énergie solaire intéresserait donc de grandes régions du globe de sorte que les variations d'albedo et la redistribution de l'énergie nous ramènent aux questions ci-dessus mentionnées à propos des rejets thermiques.

On doit alors se demander s'il n'y aurait pas lieu d'harmoniser les études dans le domaine des sciences de l'atmosphère et dans celui de l'énergie.

## 9. INTEGRATION DE L'ENERGIE DANS L'HYDROSPHERE

La figure 10 fournit les données essentielles à cet égard. La moyenne des précipitations sur la Terre est de 101 cm par an, soit  $513 \times 10^3 \text{ km}^3/\text{an}$  et il faut que cette même quantité s'évapore. Mais le rapport entre l'évaporation et les précipitations n'est pas le même pour les océans et les continents. L'eau est transportée des océans vers les continents où elle alimente les cours d'eau dont le débit est de  $35 \times 10^3 \text{ km}^3/\text{an}$ . Le tableau 12 indique comment se répartit la consommation d'eau. Contrairement à ce que l'on croit généralement, l'irrigation absorbe la majeure partie de l'eau consommée aujourd'hui mais, en l'an 2000, il ne devrait plus en être de même. Lvovich [30] estime qu'en l'an 2000 la consommation sera d'environ  $13\,000 \text{ km}^3/\text{an}$  soit environ le tiers du débit des cours d'eau. Il est à noter toutefois que dans la plupart des cas les moyennes mondiales ne sont pas représentatives et que la situation peut varier considérablement d'une région à l'autre. Dans la Ruhr,  $0,63 \text{ km}^3/\text{an}$  d'eau utilisée par l'industrie est perdue par évaporation; c'est l'équivalent de 14 cm par an ou en gros le tiers du débit des cours d'eau de la région. Ces considérations n'ont pas encore de rapport avec l'énergie mais elles fournissent une unité de mesure pour évaluer les relations pertinentes.

La première relation a trait au dessalement de l'eau. Selon certaines estimations on pourrait cultiver  $32 \times 10^6 \text{ km}^2$  de sol (la surface totale des continents est de  $148 \times 10^6 \text{ km}^2$ ). Les terres arides couvrent environ  $20 \times 10^6 \text{ km}^2$  et des quantités d'eau suffisantes doivent

Fig. 10 Cycle de l'eau  
(d'après Lvovich 1970)

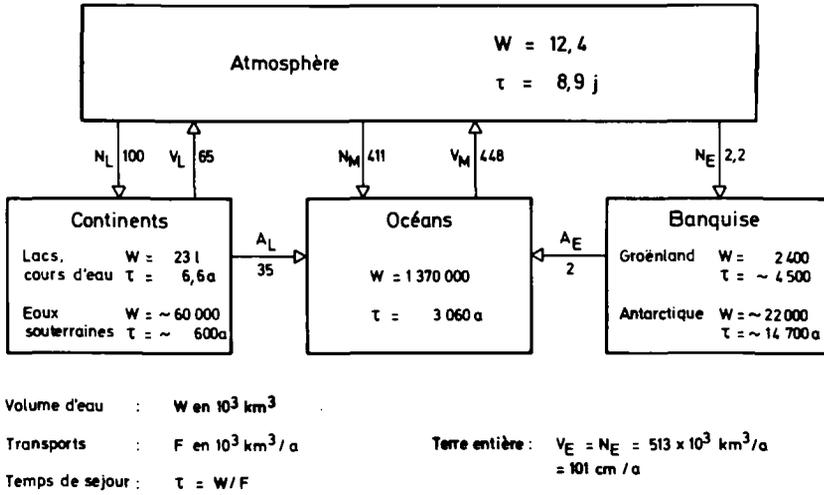


Tableau 12 Consommation d'eau (d'après Lvovich 1969) et ressources en eau

Consommation d'eau	1965			2000		
	Consommation	Eaux usées	Evaporation	Consommation	Eaux usées	Evaporation
Distribution urbaine	98	56	42 km <sup>3</sup> /a	950	760	190 km <sup>3</sup> /a
Irrigation	2 300	600	1700 ..	4 250	400	3 850 ..
Industrie	200	160	40 ..	3 000	2 400	600 ..
Centrales	250	235	15 ..	4 500	4 230	230 ..
<b>Total</b>	<b>2 848</b>	<b>1 051</b>	<b>1 797 ..</b>	<b>12 700</b>	<b>7 790</b>	<b>4 910 ..</b>

leur être fournies. Le tableau 13 montre que, pour combler la différence entre les zones arides et les terres cultivées des zones autrefois arides, il faudrait une quantité d'eau égale à 200 cm de pluie par an, soit 40 000 km<sup>3</sup>/an pour  $20 \times 10^6 \text{ km}^2$ . Il ressort nettement de la figure 10 que cette quantité d'eau ne peut être obtenue que par dessalement. A cette fin il faudrait aujourd'hui à peu près 50 KWh/m<sup>3</sup> soit 7 Q par an. Cela fait une quantité d'énergie à peu près égale à celle que représentent les chiffres de 20 KW par habitant pour la consommation d'énergie et de  $10^{10}$  pour la population cités antérieurement; on aboutit ainsi au total de  $7 + 6 = 13$  Q par an. Il ne s'agit là évidemment que d'un ordre de grandeur.

**Tableau 13 Valeurs représentatives du bilan énergétique en Egypte  
(d'après Flohn 1971)**

	Terres arides	Terres cultivées
Apport d'énergie solaire	280 W/m <sup>2</sup>	280 W/m <sup>2</sup>
Albedo	25 %	10 %
Rayonnement de corps noir, valeur nette	32,5 W/m <sup>2</sup>	38 W/m <sup>2</sup>
Solde Q net	170 W/m <sup>2</sup>	205 W/m <sup>2</sup>
a) Evaporation	2 cm / a	220 cm / a
b) Chaleur de vaporisation	1,7 W/m <sup>2</sup> $\approx$ 1% de Q	176 W/m <sup>2</sup> $\approx$ 86% de Q
c) Chaleur sensible + reste	99 % de Q	14 % de Q
Rapport de Bowen: $\frac{\text{chaleur sensible}}{\text{chaleur latente}}$ 104		
		0,16

**Tableau 14 Limites de la production d'électricité dues aux rejets  
thermiques**

Total de l'eau d'alimentation des cours d'eau ○—○

A) Elévation  $\Delta T$  de la température de cette eau

$$\frac{N_{th}}{F} = 0,054 \cdot \Delta T \text{ W/m}^2$$

(par exemple  $\Delta T = 2^\circ\text{C} \longrightarrow \frac{N_{th}}{F} = 0,1 \text{ W/m}^2$ )

B) Evaporation de toute cette eau (tours de refroidissement à eau)

$$\frac{N_{th}}{F} = 40 \text{ W/m}^2$$

Il est évident qu'ici l'utilisation du sol par la mise en culture des régions arides, l'utilisation de l'eau et l'utilisation de l'énergie vont de pair.

Il y a d'autres interactions énergie—eau mais, en fait, la densité des précipitations limite la production d'électricité. La différence entre les précipitations et l'évaporation — en moyenne 40 cm/an — représente l'alimentation des cours d'eau dont le débit est donc proportionnel aux précipitations si leur moyenne est calculée pour une superficie suffisamment grande. Considérons maintenant la quantité de chaleur qui peut être rejetée dans l'ensemble des cours d'eau soit par refroidissement en circuit ouvert soit au moyen de tours de refroidissement à eau. Ces données sont résumées au tableau 14. En raison des rapports qui existent entre les précipitations et le débit des cours d'eau, ici encore les limites sont exprimées en unités de puissance surfacique, ce qui se rapporte intrinsèquement à l'utilisation du sol. Un réchauffement de 5°C de tous les cours d'eau ne permet de dissiper que 0,25 W/m<sup>2</sup> mais cette relation, assurément assez sommaire, aboutit quelquefois à des résultats étonnamment satisfaisants. En République fédérale d'Allemagne, par exemple, on a recours au refroidissement en circuit ouvert pour 30 GW environ de la puissance installée. A cela correspondent approximativement 60 GW ou 0,24 W/m<sup>2</sup> de rejets thermiques, ce qui donne naissance à une situation telle que le réchauffement des cours d'eau et des lacs est la cause de légitimes préoccupations.

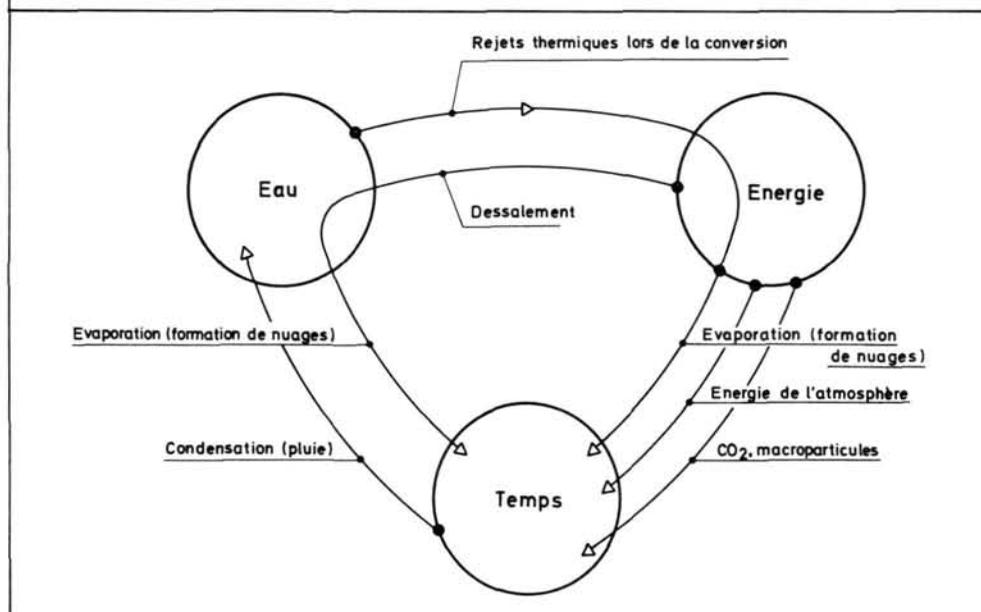
Les tours de refroidissement à eau sont utiles pendant un certain temps, mais seule une partie du débit des cours d'eau peut être utilisée dans ces tours. Si l'on compare alors ces puissances aux puissances artificielles de demain, on comprend qu'il y aura effectivement un problème. Il ressort d'études plus approfondies faites en République fédérale que les tours de refroidissement à eau ne seront probablement utiles que pendant une quinzaine d'années [31].

Nous avons déjà fait état d'une troisième relation eau—énergie: la rétroaction des rejets thermiques sur le régime et la quantité des précipitations.

La figure 11 tente de faire apparaître plus nettement cette interdépendance entre l'eau, l'énergie et le temps. C'est une sorte de récapitulation ce qui a été dit dans le présent chapitre et dans le précédent.

Nous nous sommes essentiellement référés jusqu'à présent à l'eau des continents, mais il faut également tenir compte des énormes masses d'eau que constituent les océans. Elles peuvent aussi servir de source froide mais des questions se posent alors en matière d'écologie et de dynamique des courants océaniques. Il se peut qu'il faille délimiter des régions océaniques qui soient stables et ne soient pas perturbées par d'importants rejets thermiques. Il faudrait donc dissocier l'étroite interdépendance de l'eau, de l'énergie et du temps (figure 11). Les parcs de production d'énergie d'origine nucléaire construits près des océans ou sur les océans, soulèvent le problème du transport de l'énergie sur de grandes distances. Pour bien comprendre ce problème, il faut se rendre compte qu'aujourd'hui, nulle part, on ne transporte l'énergie électrique sur des distances vraiment grandes. En République fédérale, on ne transporte de grandes quantités d'électricité que sur des distances moyennes d'environ 150 km. La plupart des lignes haute tension ne stabilisent la distribution d'électricité qu'à l'échelon régional. Pour résoudre ce problème nouveau, plusieurs possibilités techniques existent: les lignes à très haute tension, les câbles supraconducteurs, les pipe-lines pour le transport de l'hydrogène, etc. Jusqu'à présent, les études ont porté essentiellement sur la production d'énergie, notamment en vue de développer l'énergie d'origine nucléaire. Toutefois, si l'on considère l'utilisation de l'énergie, celle du sol et celle de l'eau comme un seul et même problème, le problème technologique du transport de l'énergie peut être plus important que celui de la mise en valeur d'une autre source d'énergie.

Fig. 11 Interdépendance eau - temps - énergie

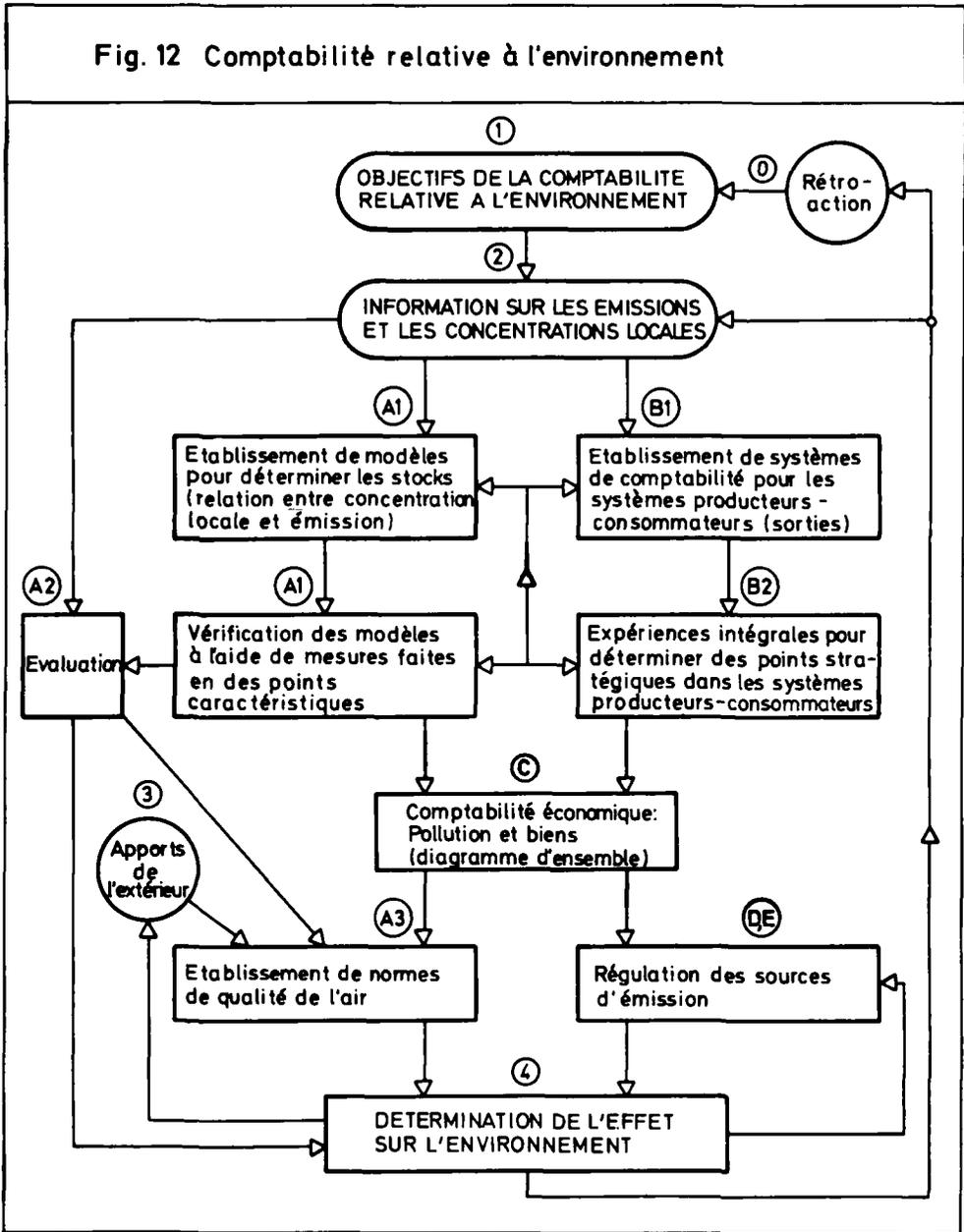


## 10. L'INTEGRATION DE L'ENERGIE DANS L'ECOSPHERE

L'intégration de l'énergie dans l'écosphère pose, entre autres, certains problèmes relatifs au milieu. Naturellement, les problèmes relatifs au milieu ne se posent pas tous de cette façon. Il est probablement raisonnable de commencer par étudier les systèmes de comptabilité. Les centrales, les régions urbaines et les véhicules émettent des agents polluants; cette émission donne lieu à des concentrations de ces agents dans le milieu. Des modèles météorologiques et hydrologiques, simples ou complexes, pourraient permettre de déterminer les relations entre ces émissions et concentrations, et des systèmes de contrôle de recueillir des données expérimentales concernant ces relations et de vérifier ainsi la validité des modèles. Parallèlement on pourrait déterminer les relations entre la production de biens industriels et certaines émissions pour établir la relation: biens-émissions-concentrations des agents polluants. On pourra ainsi, finalement, établir une comptabilité générale du flux des agents polluants, qui par elle-même donnera la possibilité de lutter contre la pollution. Pour le comprendre on doit se rendre compte que la création du système global de comptabilité des matières nucléaires qui est actuellement mis en œuvre par l'Agence internationale de l'énergie atomique [32] est la clef de la sécurité en matière d'exploitation des matières nucléaires. L'universalité d'un tel système pose certains problèmes de gestion et il conviendra d'étudier ce caractère d'universalité. Lorsqu'on le fera, il ne faudra pas oublier que l'analyse de systèmes a joué un rôle essentiel dans l'élaboration du système de garanties de l'AIEA [33].

Pour pouvoir tirer des conclusions des résultats des systèmes de comptabilité, il faut fixer des normes. L'établissement de normes peut permettre, par exemple, de déterminer des niveaux d'intervention. L'insuffisance des connaissances en matière de toxicologie, les décisions dans des conditions d'incertitude, l'acceptation par le public, les procédures législatives, etc, tout cela entre ici en ligne de compte. Le débat sur les normes à adopter en

Fig. 12 Comptabilité relative à l'environnement



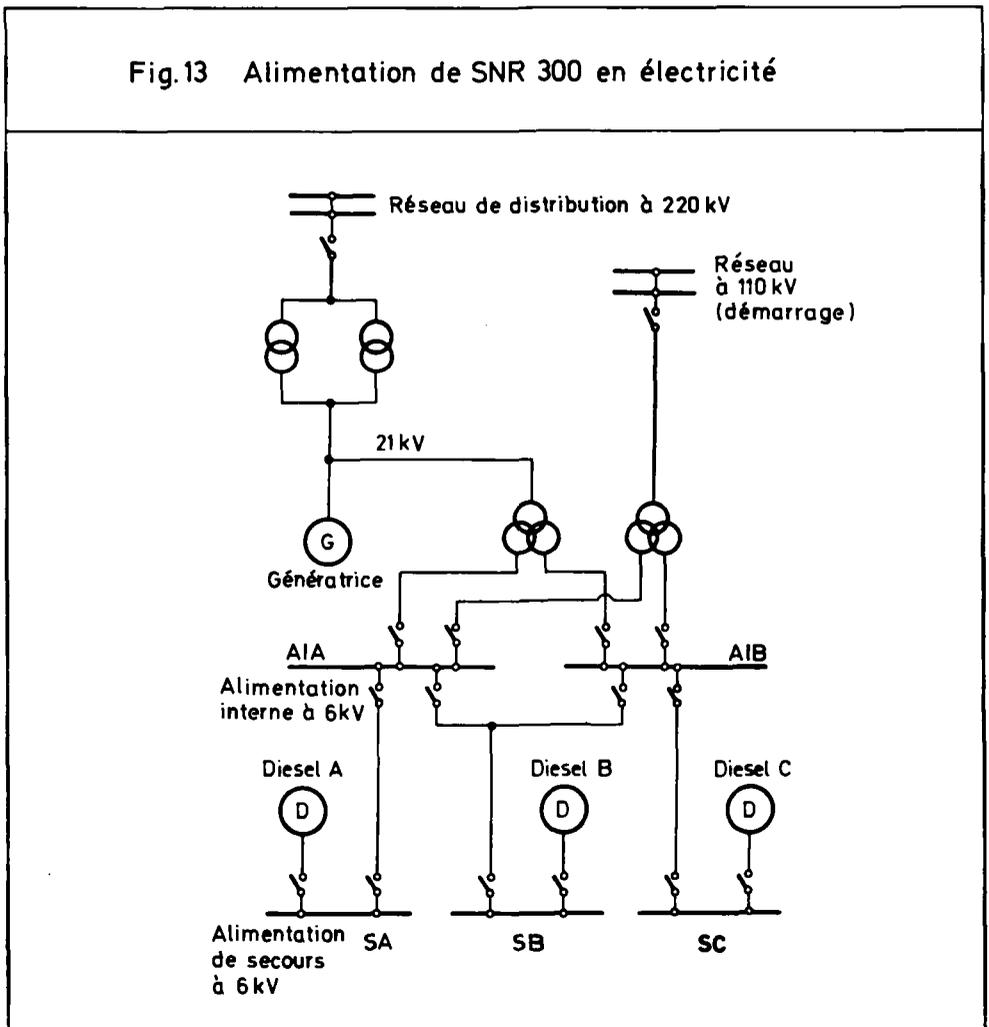
matière de débit de dose radiotoxique qui s'est déroulé aux Etats-Unis et ailleurs ces dernières années peut être cité à titre d'exemple. L'affaire Gofman-Tamplin, l'élaboration de la règle relative au débit de dose «aussi faible que possible», le rôle des audiences publiques dans la procédure et d'autres faits récents méritent d'être étudiés de façon plus approfondie sous cet angle. La figure 12 schématise ce qui a été dit ci-dessus sur la comptabilité du flux des agents polluants.

## 11. INTEGRATION DE L'ENERGIE DANS LA SOCIOSPHERE – RISQUES ET FIABILITE

Une étude approfondie du problème de la pollution entraîne également l'étude du contrôle de la fiabilité et de l'évaluation des risques. A cet égard, on se reportera utilement au tableau 9. Si l'on veut intégrer l'énergie dans l'atmosphère, il convient de considérer les risques encourus.

Il y a deux catégories de risques: les risques dus à l'insuffisance des connaissances, qui en principe peuvent être déterminés et d'autres risques qui en principe ne peuvent pas l'être [34]. Ces derniers sont dus au fait que l'application stricte de modèles scientifiques déterministes exige une connaissance complète des conditions initiales et des conditions aux limites, même lorsque l'on connaît parfaitement les lois de la nature. Dans beaucoup de cas, il est impossible d'acquérir cette connaissance; pour cela il faudrait un « Génie laplacien ». Alors apparaît la deuxième catégorie de risques.

Fig.13 Alimentation de SNR 300 en électricité

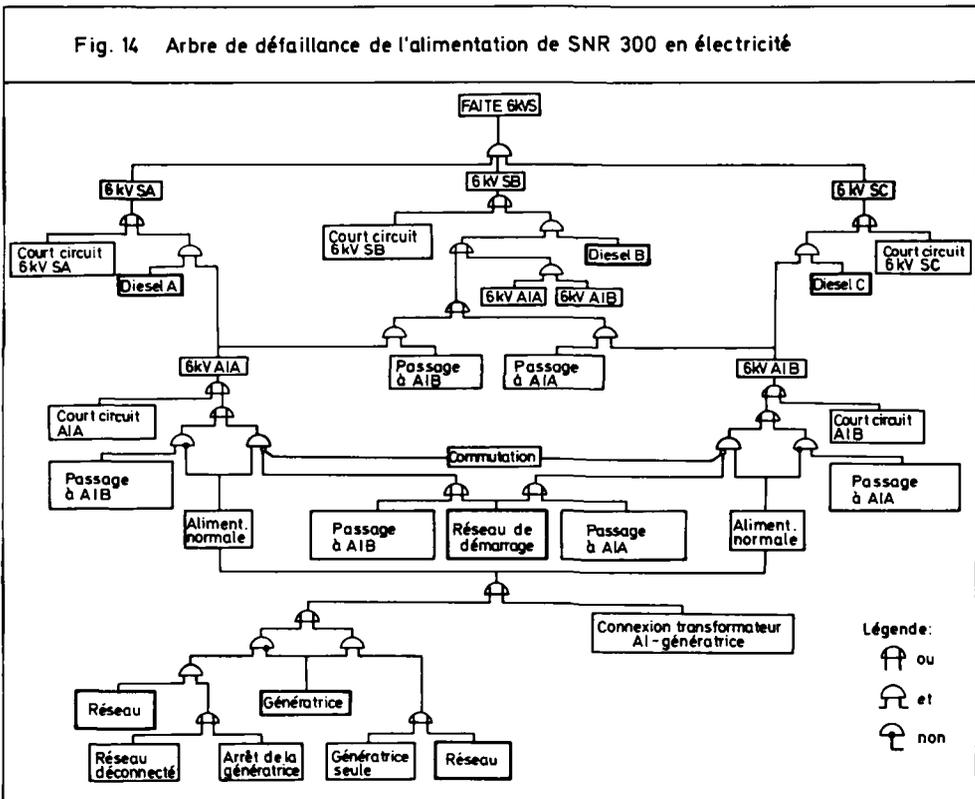


Le rejet de CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère et d'autres agents polluants crée les risques de la première catégorie. En principe, il devrait être possible de déterminer si l'augmentation de CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère influera ou non sur le climat, mais dans l'état actuel des connaissances, ce n'est pas possible.

L'énergie nucléaire crée un risque de la seconde catégorie: il est possible de produire de l'énergie sans toucher en quoi que ce soit à l'environnement, du moins en principe; toutefois, les réactions nucléaires entraînent la production de radioéléments. (Il en est de même pour l'énergie produite par les réacteurs à fusion utilisant la réaction D-T [19]). Etant donné le facteur  $2,5 \times 10^6$  (rapport entre la production d'énergie par gramme de combustible nucléaire et la production d'énergie par gramme de combustible fossile), les radioéléments ont un volume et un poids si minimes qu'ils peuvent être confinés, contrairement aux produits de la combustion des combustibles fossiles qui sont rejetés dans l'environnement ainsi qu'il est indiqué ci-dessus. Le confinement est une opération technique, mais toutes les opérations techniques peuvent rater et c'est ce qui constitue le risque.

Alors que les risques de la première catégorie peuvent en principe être éliminés, il n'est pas de même des risques de la seconde catégorie. Mais les risques inhérents aux opérations techniques peuvent être ramenés à un chiffre inférieur à un risque limite résiduel, qui peut être aussi petit que l'on veut. Nous entrons ainsi dans le domaine du contrôle de la fiabilité. La recherche spatiale, l'électronique et, plus récemment, l'énergie nucléaire sont les branches dans lesquelles les méthodes de contrôle de la fiabilité ont été mises au point et appliquées. Le principal instrument du contrôle de fiabilité est l'arbre de défaillance.

Fig. 14 Arbre de défaillance de l'alimentation de SNR 300 en électricité



Le faîte de cet arbre représente un événement accidentel non souhaité. Des symboles logiques aident à représenter la structure logique de la fiabilité d'un système donné. La figure 13 représente une alimentation de secours pour le prototype de réacteur surgénérateur belgo-germano-hollandais SNR 300, et la figure 14 l'arbre de défaillance qui a été utilisé pour évaluer la fiabilité de ce système. L'arbre en question permet d'évaluer le taux de défaillance du système à l'aide d'une simulation automatique qui utilise notamment la méthode de Monte Carlo.

Toutefois il faut encore résoudre certains problèmes méthodologiques. Dans la plupart des cas, les données d'entrée (les taux de défaillance des divers éléments des systèmes) ne sont pas suffisantes, il est difficile de garantir que l'arbre considéré est parfaitement adapté au but poursuivi, il faut évaluer les niveaux de confiance etc. Il faut cependant élaborer des méthodes de contrôle de la fiabilité pour la plupart des futurs projets technologiques car la société sera de plus en plus tributaire de la technologie.

Même une maîtrise parfaite des méthodes de contrôle de la fiabilité ne permettrait pas d'assurer la fiabilité totale d'un système donné. Le risque limite résiduel peut être très faible, il sera toujours différent de zéro. Il faudra donc fixer d'avance des spécifications pour

Tableau 15 Accidents mortels aux Etats-Unis en 1967		
Type d'accident	Nombre total de morts	Probabilité de décès pour une personne par an
Véhicules automobiles (V.A.)	52 924	$2,7 \times 10^{-4}$
Chutes	20 120	$1,0 \times 10^{-4}$
Incendies et explosions	7 423	$3,7 \times 10^{-5}$
Armes à feu	2 896	$1,5 \times 10^{-5}$
Avions	1 799	$9,0 \times 10^{-6}$
Accidents de chemin de fer (non compris V.A.)	997	$5,0 \times 10^{-6}$
Courant électrique	376	$1,9 \times 10^{-6}$
Foudre	88	$4,4 \times 10^{-7}$
Explosion d'enceintes sous pression	42	$2,1 \times 10^{-7}$
Tramways (non compris les collisions avec un V.A.)	5	$2,5 \times 10^{-8}$
( National Safety Council , Chicago 1970 )		

ces risques limites résiduels, comme il est apparu nécessaire de fixer des normes pour l'évaluation des systèmes de comptabilité du flux des agents polluants. Ces spécifications ne peuvent être déterminées qu'à partir de l'évaluation de risques existants. L'évaluation des risques, en tant que discipline scientifique, n'en est encore qu'à ses débuts et il convient de mentionner expressément ici les travaux de C. Starr et Erdmann (Université de Californie, Los Angeles) et de H. Otway (AIEA). On verra au tableau 15 un spectre des risques existants. Starr [35] a pu évaluer des quasi-lois. Ainsi, par exemple, il y a, semble-t-il, entre les risques volontaires et les risques involontaires une différence

**Fig. 15 Relation entre les taux d'accidents et les taux de salaire horaire dans les industries extractives**

(Ch. Starr, *Benefit - Cost Studies in Socia-Technical Systems*, avril 1971)

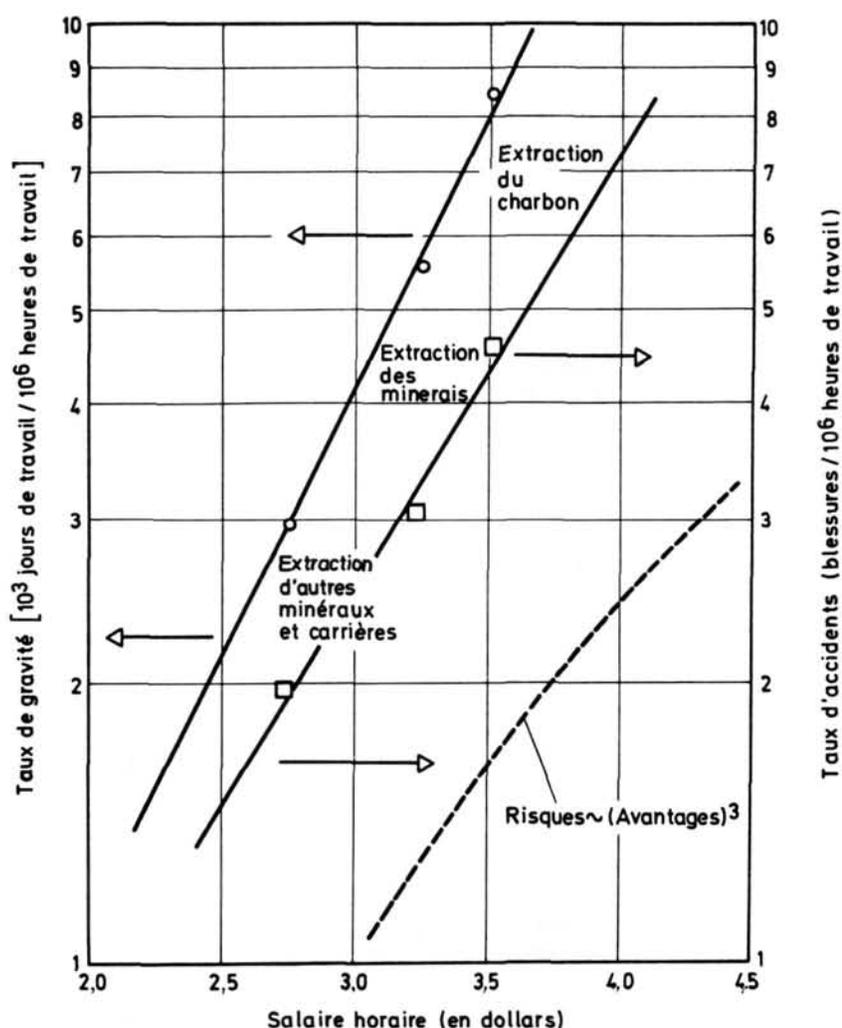
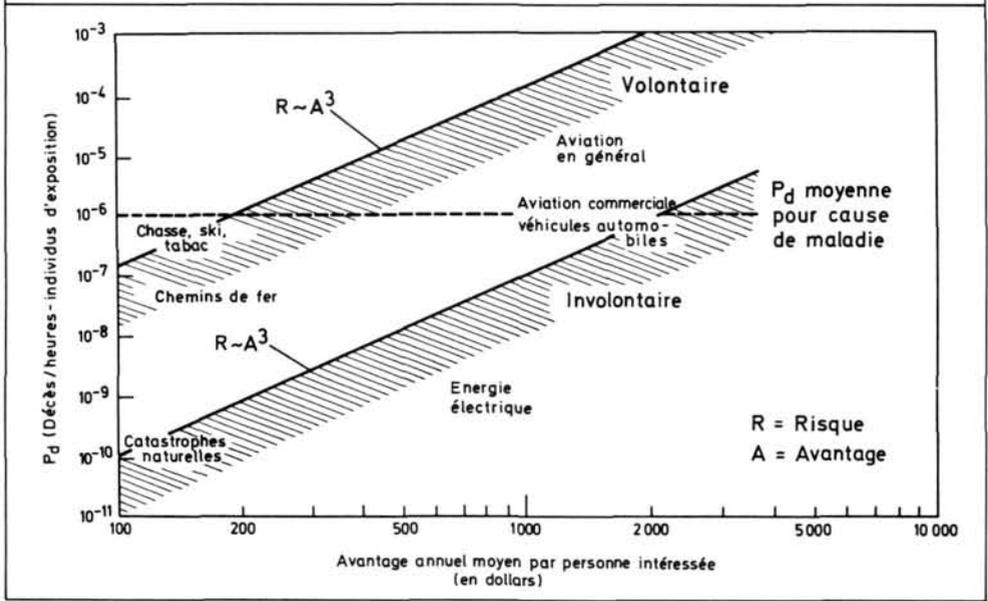


Fig. 16 Relation risques/avantages  
Exposition volontaire et involontaire aux risques  
(Ch Starr, Benefit - Cost Studies in Socio-Technical Systems, avril 1971)



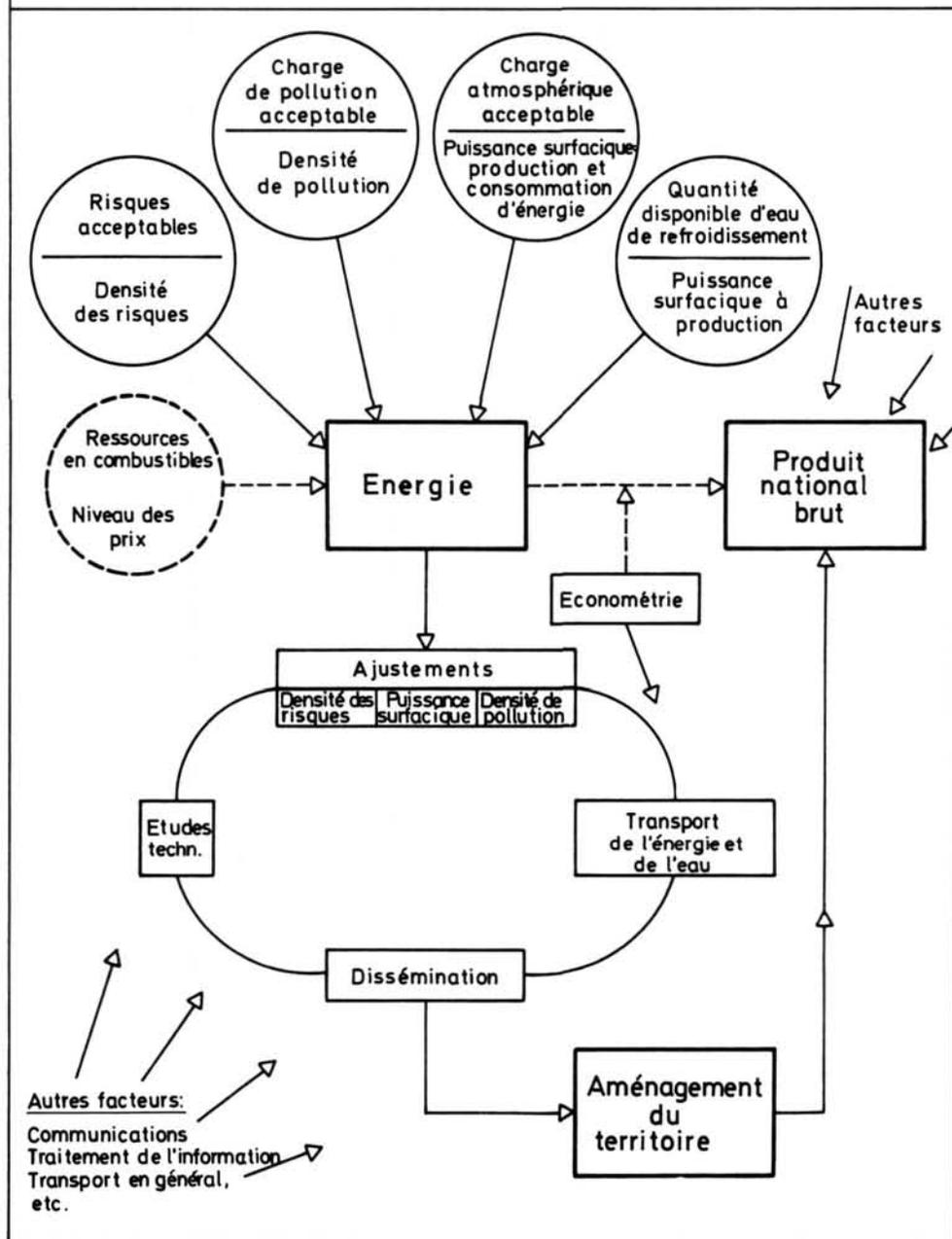
correspondant au facteur  $10^3$ . En outre, pour ce qui est des risques volontaires, il y aurait une relation entre les risques et les avantages escomptés. C'est ce que montre la figure 15. La figure 16 offre un exemple d'étude rationnelle visant à répondre à la question: quel degré de sécurité correspond à la sécurité suffisante? De toute évidence, le problème général de l'analyse de systèmes, celui de la quantification, devient particulièrement aigu dans le cas de l'évaluation des risques. Les études devront être poursuivies dans ce domaine et l'on parviendra peut-être ainsi à élaborer des méthodes d'évaluation plus satisfaisantes.

## 12. SYSTEMES CENTRES SUR L'ENERGIE

Il devrait être possible, à présent, de donner une idée du sens que nous donnons au terme systèmes centrés sur l'énergie.

Nous avons déjà fait ressortir que la relation simple schématisée par la figure 6 n'était pas suffisante. Comme nous l'avons vu, à long terme, la production de grandes quantités d'énergie n'est pas une contrainte — il y a suffisamment d'énergie. Mais il y aura vraisemblablement d'autres contraintes rigoureuses. L'une d'elles est la quantité d'eau de refroidissement disponible, si l'on construit les centrales sur les continents. La limite, ici, est imposée par la puissance surfacique. De même, la charge thermique admissible pour l'atmosphère est aussi une limite exprimée par une densité. En matière de concentrations d'agents polluants, il en sera ainsi pendant longtemps encore, bien qu'il puisse finalement y avoir des limites absolues. Le cas de  $CO_2$  peut être cité à titre d'exemple à cet égard. Les risques limites peuvent être exprimés par une densité, comme le montre l'étude du choix des sites des réacteurs. Par exemple si un aéroport, une usine chimique et deux centrales nucléaires étaient construits au même endroit, on considérerait peut-être

Fig.17 Energie - aménagement du territoire - produit national brut



que cet ensemble constitue une accumulation de risques trop importante. Il faudrait alors répartir les risques.

La figure 17 montre ce que l'on entend par systèmes centrés sur l'énergie. Les pointillés font apparaître la relation traditionnelle schématisée à la figure 6 et les cercles indiquent des

contraintes. Chaque contrainte comporte une notion d'acceptabilité; c'est l'élément sociologique de la contrainte. Dans les limites de ces contraintes on peut produire de l'énergie. L'optimisation consiste à ajuster la densité de risques, la puissance surfacique et la densité de pollution. Les moyens qui le permette sont le progrès technique, la dissémination des installations et le transport de l'énergie et de l'eau sur de grandes distances. Une fonction généralisée des objectifs, comme il est dit au chapitre 3, serait utilisée pour cette optimisation. De cette manière, l'économétrie devient une discipline plus générale qu'auparavant. Il est évident qu'il faut tenir compte d'autres facteurs lorsque l'on cherche à déterminer la politique à long terme. C'est ainsi que les besoins en matière de communications, de traitement de l'information et de transport en général entrent aussi en ligne de compte. Mais la portée du système est désormais assez grande pour permettre de décrire les effets prévisibles en ce qui concerne l'énergie et d'intégrer les systèmes centrés sur l'énergie dans un supersystème. Le résultat de l'optimisation est un plan d'aménagement du territoire (utilisation du sol). Ce n'est que par l'intermédiaire de l'aménagement du territoire que l'énergie aboutit au produit national brut. L'aménagement du territoire est l'un des principaux liens entre les systèmes centrés sur l'énergie et d'autres grands systèmes dans l'infrastructure de la civilisation moderne.

### 13. AUTRES OBSERVATIONS SUR LE PROBLEME DE L'ENERGIE A LONG TERME

Au début du présent article, nous avons fait observer que le moyen terme devrait être une période de transition progressive aboutissant à la troisième phase qui est le long terme. A cette fin, il faut comprendre le sens des solutions asymptotiques du problème de l'énergie. A la suite de ce qui a été dit sur l'intégration de l'énergie dans l'environnement, il est plus facile d'examiner de façon plus approfondie un exemple de solution asymptotique du problème de l'énergie.

Nous avons vu que la création de grands parcs nucléaires pourrait entraîner un certain relâchement de l'interdépendance entre l'eau, l'énergie et le temps. A cet égard, il peut falloir déterminer dans les océans certaines zones particulièrement peu sensibles aux rejets thermiques en masse tant du point de vue météorologique qu'écologique. A cette fin, il faudrait probablement établir de grands modèles météorologiques et écologiques. Ces parcs nucléaires devraient être assez vastes pour comprendre l'ensemble du cycle du combustible nucléaire. Une puissance minimale de 30 GW thermiques serait donc nécessaire. La concentration du cycle du combustible nucléaire écarterait certaines inquiétudes relatives à l'énergie d'origine nucléaire. Par exemple, le plutonium resterait constamment au même endroit et les opérations pourraient recevoir une formation très poussée et atteindre à une très grande compétence du fait de la concentration des installations. En ce qui concerne ces parcs nucléaires, la limite supérieure serait probablement déterminée par des considérations de sécurité de la fourniture d'énergie. Comme nous l'avons déjà vu, la production d'électricité n'est qu'un aspect de la question. Une économie entièrement fondée sur l'électricité n'est pas nécessairement la solution optimale. Il faut donc envisager la production d'hydrogène dans des réacteurs à haute température. On peut espérer des rendements de conversion de 75%. Dans une économie future plus ou moins stable, le gain de surgénération des grands réacteurs surgénérateurs rapides ne sera pas nécessairement obtenu sous forme de plutonium; on pourrait également produire  $^{233}\text{U}$  et l'utiliser dans des réacteurs à haute température refroidis par un gaz. Le transport de l'électricité et de l'hydrogène ne devrait pas poser de problèmes trop graves. Nous avons déjà mentionné certains problèmes techniques nouveaux dans ce domaine. On pourrait envoyer l'hydrogène dans les réseaux de gazoducs utilisés pendant le moyen terme, au cours duquel des hydrocarbures gazeux auront été employés comme combustibles secondaires. Ainsi pourrait s'effectuer une transition progressive.

L'électricité et l'hydrogène sont tous deux des combustibles secondaires très propres et l'hydrogène se prête à toutes les formes de transport et d'utilisation industrielle. La pollution à laquelle on peut s'attendre serait très faible.

De longs travaux seront nécessaires pour étudier de façon approfondie tous les aspects — et en particulier les problèmes de systèmes — d'une solution asymptotique du problème de l'énergie. Les considérations ci-dessus ne visent qu'à fournir un exemple de ce que pourrait être une solution asymptotique. Il faudra également étudier d'autres possibilités et notamment poursuivre l'étude du plan Peter Glaser consistant à recueillir l'énergie solaire dans l'espace extra-atmosphérique [23], afin de mieux comprendre les problèmes de systèmes qu'il pose.

Le présent article ne prétend pas être un élément de cette étude. Il vise seulement à faire mieux comprendre la portée du problème des systèmes centrés sur l'énergie.

## REFERENCES

- [1] M.K. Hubbert: The Energy Resources on the Earth, Scientific American, septembre 1971.
- [2] Voir par exemple Herbert S. Rickey: "Coal: Prospects and Problems", Proceedings, National Energy Forum, 23-24 sept. 1971, patronné par The National Division of the US National Committee de la Conférence mondiale de l'énergie.
- [3] Voir par exemple «Quandary», R-1084-NSF/CSRA, R-1115-RF/CSA, R-1116-NSF/CSA, septembre 1972, RAND, Santa Monica, Calif.
- [4] Walter J. Levy: Oil Power, Foreign Affairs, juillet 1971, Vol.49, No 4.
- [5] Walter J. Levy: An Atlantic-Japanese Energy Policy, Europe — America Conference, Amsterdam, Pays-Bas, 27 mars 1973.
- [6] Stephen D. Bechtel Jr.: "Energy for the Future: New Directions and Challenges", Annual Meeting of the American Gas Association, Cincinnati, Ohio, 16 octobre 1972. Voir également Nuclear News, publié par l'American Nuclear Society, juillet 73, Vol.16, No 9.
- [7] H.C. Hottel et J.B. Howard: New Energy Technology, Some Facts and Assessments, Chapitre 3, MIT Press, Cambridge, Mass., et Londres, Angleterre, 1971.
- [8] P.F. Schweizer, C.G. Love et J. Hunter Chiles III: A Regional Energy Model for Examining New Policy and Technology Changes, présentation orale à la conférence du MIT sur: Energy, Demand, Conservation and Institutional Problems, fév. 1973, Massachusetts Inst. of Techn., Cambridge, Mass., EUA.
- [9] Alan S. Manne: On Linking Energetics to Dynamics, Partie 3 de l'étude: Multi Level Planning, Case Studies in Mexico, Stanford University.
- [10] A.M. Weinberg et P. Hammon: Actes Quat. Conf. Int. sur «l'Utilisation de l'énergie atomique à des fins pacifiques», Genève, sept. 1971.
- [11] C. Starr: Energy and Power, Scientific American, Vol. 225, No 3, sept. 1971, p. 37.
- [12] Earl Cook: Communication privée, Mémoire pour le Congressional Research Service, Library of Congress of the United States, en cours de publication.
- [13] M.K. Hubbert: Energy Resources for Power Production, Comptes rendus du Colloque de l'AIEA sur les problèmes de l'environnement liés aux centrales nucléaires, New York, août 1970, AIEA-SM-146/1.
- [14] V.E. McKelvey et D.C. Duncan: United States and World Resources of Energy, Mineral Resource Development Ser., No 26, II (1969) 9.
- [15] R.V. Davies et al.: Extraction of Uranium from Sea Water, Nature 203, 1110 (1964).
- [16] Voir par exemple Ergänzendes Material zum Bericht: "Kernbrennstoffbedarf und Kosten verschiedener Reaktortypen in Deutschland", KFK 466, septembre 1966, Gesellschaft für Kernforschungszentrum Karlsruhe, Allemagne.
- [17] Engineering of Fast Reactors for Safe and Reliable Operation. Karlsruhe, Gesellschaft für Kernforschung.
- [18] A.M. Perry et A.M. Weinberg: Thermal Breeder Reactors, Annual Review of Nuclear Science, Vol.22, 1972.
- [19] W. Häfele et C. Starr: A Perspective on the Fusion and the Fission Breeders, Kernforschungszentrum Karlsruhe et University of California, Los Angeles, 1973, en cours de publication.

- [20] J.D. Lee: Tritium Breeding and Energy Generation in Liquid Lithium Blankets, Proceedings BNES Conf. on Nuclear Fusion Reactors, Culham, sept. 1969, BNES 1970.
- [21] D.E. White: U.S. Geolog. Surv. Circ. 519, Wash. (1965).
- [22] R.W. Rex: Geothermal Energy, the neglected energy option, Science and Public Affairs, Bulletin of the Atomic Scientists, octobre 1971, Volume XXVII, No 8.
- [23] P.E. Glaser: Power from the Sun: its Future Science, Vol. 162, 1968.
- [24] P.E. Glaser: Power without Pollution, Journal of Microwave Power, Vol. 5, No. 4, déc. 1970.
- [25] W. Häfele: voir par exemple 150 Jahrfeier, Munich, 1972.
- [26] H. Büker, P. Jansen, W. Sassin, W. Schikarski: Kernenergie und Umwelt, Tableau 21, page 47, Kernforschungszentrum Karlsruhe, KFK-1366, ou Kernforschungsanlage Jülich, Jül-929-HT-WT, mars 1973.
- [27] C. Starr, M.A. Greenfield et D.F. Hausknecht: A comparison of public health risks: nuclear versus oil-fired power plants, Nuclear News, publié par l'American Nuclear Society, octobre 1972, Vol. 15, No 10.
- [28] Voir par exemple William H. Matthews, William W. Kellogg, et G.D. Robinson: Man's Impact on the Climate, the MIT Press, Cambridge, Massachusetts, et Londres, Angleterre, 1971.
- [29] The first GARP global experiment, objectives and plans, GARP publication series, No 11, mars 1973, Organisation météorologique mondiale et Conseil international des Unions scientifiques.
- [30] M.I. Lvovitch: World Water Balance (General Report), Publications de l'Association internationale d'hydrologie scientifique 93 (1969).
- [31] Voir [26], page 15 ff.
- [32] Agence internationale de l'énergie atomique, Structure et contenu des accords à conclure entre l'Agence et les Etats dans le cadre du Traité sur la non-prolifération des armes nucléaires, AIEA, Vienne, INF/CIRC/153, 1971.
- [33] W. Häfele: L'analyse de systèmes et le contrôle des matières nucléaires, Actes Quat. Conf. Int. sur l'utilisation de l'énergie atomique à des fins pacifiques, Genève, sept. 1971, ONU, New York, AIEA, Vienne, Vol. 9, p. 303, 1972.
- [34] W. Häfele, Ergebnis und Sinn des SEFOR Experimentes in: Einheit und Vielheit, Festschrift für Carl Friedrich von Weizsäcker zum 60. Geburtstag, Vandenhoeck et Ruprecht, Göttingen-Zürich, 1973.
- [35] C. Starr: Benefit-Cost Studies in Socio-Technical Systems Colloquium on Benefit-Risk, Relationships for Decision Making, Washington D.C., 26 avril 1971.