

DIGITHÈQUE

Université libre de Bruxelles

Revue de l'Université de Bruxelles, 1981/4, Bruxelles : Université Libre de Bruxelles, 1981.

http://digistore.bib.ulb.ac.be/2011/DL2503255_1981_4_000.pdf

Cette œuvre littéraire est soumise à la législation belge en matière de droit d'auteur.

Elle a été publiée par l'**Université Libre de Bruxelles** et numérisée par les Archives & Bibliothèques de l'ULB.

Tout titulaire de droits sur l'œuvre ou sur une partie de l'œuvre ici reproduite qui s'opposerait à sa mise en ligne est invité à prendre contact avec la Digithèque de façon à régulariser la situation (email : [bibdir\(at\)ulb.ac.be](mailto:bibdir(at)ulb.ac.be)).

Les règles d'utilisation de la présente copie numérique de cette œuvre sont visibles sur la dernière page de ce document.

L'ensemble des documents numérisés mis à disposition par les Archives & Bibliothèques de l'ULB sont accessibles à partir du site <http://digitheque.ulb.ac.be/>



revue de l'université de bruxelles

éditions de l'université de bruxelles

L'énergie aujourd'hui



1063P 4/81

revue de l'université de bruxelles — 1981/4

l'énergie



comité de rédaction de la revue de l'université

Directeur	Jacques Sojcher
Membres	Paul Bertelson, Jean Blankoff, Jean-Pierre Boon, Gilbert De Busscher, Jacques Devooght, Michel Hanotiau, Hervé Hasquin, Robert Pirson, Christian Vandecasserie, Pierre Van der Vorst.
Secrétaire de Rédaction	Adolphe Nysenholc
Rédaction	Rue du Magistrat 10 1050 Bruxelles Belgique Tél. 02/649.93.31
Administration	Avenue Paul Héger, 26 1050 Bruxelles Belgique Tél. 02/649.00.30 ext. 3799

Revue publiée avec l'aide du Ministère de l'Éducation Nationale et de la Culture française.

Les articles n'engagent que leurs auteurs.

© 1981 by **Éditions de l'Université de Bruxelles**. Tous droits de traduction et de reproduction réservés pour tous pays. Imprimé en Belgique.

l'université et les problèmes de l'énergie

1. PRISE DE CONSCIENCE

Lentement mais sûrement, l'opinion publique a pris conscience de la crise énergétique.

A-t-elle pour autant conscience de toutes ses implications ?

Ne vit-elle pas dans l'illusion dangereuse qu'il suffirait d'une décision politique consécutive à un grand débat dans l'opinion et/ou au Parlement pour que le problème soit résolu ?

Trop de nos concitoyens ne pensent-ils pas que la mise en œuvre massive et quasi instantanée de l'énergie solaire ou charbonnière ou de la gazéification souterraine ou de l'exploitation des sables asphaltiques ne dépend que de cette décision politique ?

Il n'en est malheureusement rien.

Un immense effort est nécessaire, tant en recherche fondamentale qu'en recherche appliquée, pour mettre à disposition les énergies qui prendront le relais de celles d'aujourd'hui.

L'humanité baigne dans l'énergie : l'énergie solaire, l'énergie géothermique, l'énergie hydroélectrique, l'énergie des marées et de la houle représentent un grand multiple de la totalité de l'énergie que nous consommons aujourd'hui mais ces énergies ne sont mobilisables que progressivement et à un prix bien supérieur au prix actuel.

Il ne faut pas parler en termes de choix mais en termes de complémentarité. L'énergie solaire et l'énergie nucléaire ne sont pas concurrentes ; l'une et l'autre seront nécessaires, ainsi que toutes les autres. Et les économies d'énergie sont aussi vitales que le développement de nouvelles sources d'énergie.

Dans le domaine de l'énergie, il faut informer, à tous les niveaux encore et toujours.

Informer, c'est un travail de Sisyphe.

Il faut le courage et la volonté de la poursuivre avec opiniâtreté. L'Université a ce courage et cette opiniâtreté.

2. LA MODÉLISATION

Dans le domaine de l'énergie, les inerties sont grandes⁽¹⁾, d'où l'intérêt de percer l'incertain de l'avenir par l'étude de modèles.

Pendant 25 ans, la prévision de la consommation d'énergie primaire et d'électricité a été aisée à faire : il y avait corrélation entre la croissance de la demande d'énergie primaire, de la consommation d'électricité et la croissance du PIB par habitant.

Pour l'énergie, le coefficient d'élasticité était pratiquement de un dans les pays industrialisés.

On a enfin pris conscience que l'énergie devenait peu à peu un produit rare.

Les importations d'énergie pèsent dramatiquement sur la *balance commerciale* des pays de la C.E.E., la Belgique en particulier ; elles contribuent dans une part non négligeable à l'*inflation*. La création de nouvelles capacités de production, classiques ou nucléaires, est *coûteuse en capital*, autre denrée à économiser.

L'augmentation de la consommation d'énergie a, en outre, des conséquences néfastes sur l'environnement.

Il résulte de ces faits qu'une *politique visant à la dissociation entre la croissance économique et la consommation d'énergie* est devenue indispensable pour la santé économique de nos pays, pour leur sécurité d'approvisionnement et pour la sauvegarde de l'environnement.

Sans cette orientation politique nouvelle, l'Europe sera définitivement sous la dépendance de ses approvisionnements en énergie.

La recherche de cette dissociation exige :

- une stratégie d'économies d'énergie pour laquelle le potentiel technologique existe ;
- une stratégie de récupération des énergies perdues ;
- une stratégie de substitution, visant à remplacer le pétrole partout où c'est possible par un autre combustible.

Dans les trois domaines, l'Université est d'ores et déjà largement présente comme les exposés ultérieurs le montreront, au-delà des exemples qui illustreront mon propos.

⁽¹⁾ 5 ans entre la décision de construire une centrale classique et son exploitation, plus d'une décennie pour une centrale nucléaire de 1300 MW.

Une politique de dissociation entre la croissance économique et la croissance de la consommation en énergie aura pour résultat de diminuer le coefficient d'élasticité énergie/PIB.

La modélisation est une analyse fine qui tend à introduire toutes les variables du problème.

Les modèles sont toujours basés sur des hypothèses ; ils ne peuvent prendre en compte les phénomènes perturbateurs créant des discontinuités non prévisibles (comme les crises politiques).

Les modèles ne sont donc que des scénarios et non des prévisions de l'avenir.

Les modèles permettent d'étudier la sensibilité aux diverses variables et, par conséquent, de *déterminer les variables principales*. Ils rendent ainsi un service inestimable car l'intuition est dangereuse dans ce domaine.

A partir de ces variables principales, on peut élaborer des *modèles simplifiés ou compacts* dont le maniement est plus simple et plus rapide.

Il existe des modèles de l'évolution de l'économie, de la consommation d'énergie, de celle d'électricité pour le monde, pour des ensembles de pays comme la C.E.E. et enfin pour des pays.

Il importe évidemment que ces modèles soient *cohérents*, c'est-à-dire que les *variables exogènes* qui y sont introduites soient cohérentes.

Une part du programme national R-D Energie a été consacrée à la modélisation du système énergétique national : offre et demande d'énergie. M. Guillaume et son équipe du DULBEA en sont les auteurs.

D'autres voies d'approche de la demande d'énergie ou d'électricité sont accessibles notamment l'analyse sectorielle.

L'analyse sectorielle permet d'injecter dans la prévision des objectifs de politique sectorielle et des pronostics de l'évolution des techniques.

Prenons l'exemple de la sidérurgie, grosse consommatrice d'électricité. On connaît l'évolution de la consommation d'électricité par tonne de fonte produite.

On envisage de nouvelles améliorations dont on peut prendre en compte les effets.

D'autre part, la politique sectorielle de l'énergie permet d'évaluer les productions futures. On peut en déduire une prévision de la consommation d'électricité à un horizon déterminé.

On peut multiplier les exemples.

D'importants travaux d'analyse sectorielle ont été menés à l'Université de Bruxelles par l'équipe du Professeur Jottrand, dont un article plus loin fait le point.

La consommation d'énergie de la Belgique était en 1978 de 45,3 millions de TEP.

L'ensemble des prévisions pour 1990 faites selon diverses méthodologies et diverses hypothèses de croissance des prix des combustibles est caractérisée par une distribution dont :

- la moyenne est de 56,7 MTEP ;
- la dispersion (écart-type) est de 4,4 MTEP ;
- l'écart entre les estimations extrêmes et la moyenne est de quelque 12 %.

Des divergences apparaissent au niveau de la décomposition par vecteurs énergétiques. Elles sont dues aux écarts entre les hypothèses relatives à l'évolution du prix des énergies primaires.

Une vigoureuse action politique visant à la dissociation maximale de la croissance et de la consommation en énergie pourrait mener vers les estimations inférieures de la fourchette. C'est le but de la politique d'utilisation rationnelle de l'énergie (URE).

3. L'ANALYSE ÉNERGÉTIQUE

Une brève analyse de la structure économique à partir de deux paramètres – exportation et consommation industrielle – révèle une situation des plus précaires :

- chaque Belge exporte 2,2 fois plus de biens que la moyenne des pays de la Communauté ;
- la consommation d'énergie par unité de PIB est la plus élevée des pays du marché commun (avec la Grande-Bretagne) ;
- si l'on effectue une ventilation de la consommation d'énergie entre les divers secteurs, la consommation d'énergie de l'industrie par unité de PIB est maximale en Belgique (0,59 kcp industrie/100 F PIB contre 0,44 pour la moyenne des pays de la Communauté) ;
- la Belgique est dépendante de l'extérieur à plus de 90 % pour son approvisionnement énergétique et le pétrole intervient dans le total pour 53 %.

Ces faits témoignent de la vulnérabilité de l'activité économique belge dans une situation de crise du marché de l'énergie.

Cette tendance vorace en énergie doit être corrigée et même inversée. La restructuration industrielle déjà amorcée doit aller dans le sens d'une diminution de la production de biens intermédiaires à haut contenu énergétique ajouté. Une telle politique doit nécessairement s'appuyer sur *une analyse et une comptabilité du contenu énergétique ajouté des secteurs et même des produits.*

Ce type d'analyse peut être poussé plus loin, jusqu'à une comptabilité de la totalité de l'énergie requise pour la fabrication du produit en prenant en considération les consommations d'énergie de tous les secteurs ayant fourni les matières premières utilisées, en remontant jusqu'aux produits naturels (minerais, combustibles fossiles, etc.).

L'Université s'est intéressée à ce type d'analyse.

La comptabilité énergétique doit être poussée jusqu'à l'analyse des unités de production d'énergie, surtout pour les énergies de remplacement.

Il est intéressant de se poser la question de savoir pendant combien de temps une installation de production d'énergie électrique doit fonctionner pour produire une énergie équivalente à celle qui a été absorbée au total pour sa construction.

La question a été posée pour les installations nucléaires.

Elle doit l'être pour d'autres types d'installations, notamment les centrales solaires.

Quel est le temps de *retour en énergie* d'une centrale solaire ?

Le Professeur Devooght a fait dans ce domaine des calculs éclairant notamment les coûts sociaux liés à l'énergie.

Avec les coûts sociaux, nous dépassons le domaine de la comptabilité énergétique.

Les divers moyens de production de l'énergie ont une influence sur l'environnement. Il est intéressant de tenter de cerner ce problème qualitativement. C'est l'objet d'une ligne de travaux poursuivis sur la *fonction de dégradation* qui prend en compte les effets sur l'environnement. Ce type de fonction a été introduit par le Professeur Borel, de l'Ecole Polytechnique de Lausanne.

L'introduction de la fonction de dégradation met en lumière :

- sur le plan technique : la diminution du service exergétique positif rendu par la prise en compte du service exergétique négatif de dégradation ;

- sur le plan économique : l'augmentation du prix de revient global de l'exergie fournie par l'installation due à la dégradation qu'elle provoque.

Ainsi donc l'Université de Bruxelles est largement engagée dans la comptabilité énergétique, exergetique et par conséquent, dans l'étude des coûts sociaux des divers secteurs, industriels et produits.

4. LES ÉCONOMIES D'ÉNERGIE

Différentes études ont été faites pour évaluer les *gisements d'économie* d'énergie. Une synthèse de qualité a été faite à la demande de la C.E.E. par un groupe de travail présidé par Jean Saint-Géours⁽²⁾ sous le titre "Pour une croissance économe en énergie". D'après ce document, auquel nous renvoyons pour une analyse détaillée, les potentiels d'économie varient entre :

- 20 à 35 % pour les transports ;
- 15 à 35 % pour l'industrie et l'agriculture ;
- jusqu'à 50 % dans les secteurs domestique et tertiaire.

Il n'est pas vain d'agir pour explorer ce gisement, même s'il est surévalué.

Prenons à titre d'exemple le secteur industriel.

On peut classer les économies à faire par ordre de complexité et le coût croissant des investissements nécessaires.

1. Il y a d'abord des modifications des *conditions d'exploitation*, essentiellement des réglages et des nettoyages, qui n'exigent aucun investissement.
2. Viennent ensuite de légères *modifications des équipements*, à faible investissement : augmentation des moyens d'instrumentation, calorifugeage, investissement dans les systèmes de régulation pour lesquels le développement accéléré des microprocesseurs offre actuellement des possibilités énormes pour la gestion énergétique.
3. L'adaptation des équipements aux conditions réelles de fonctionnement est importante : on ne mesure pas assez le gaspillage d'énergie dû à des éléments, des machines (pompes et ventilateurs, par exemple) surdimensionnés au départ, pour être en sécurité.

(2) Groupe auquel le Professeur PRIGOGINE a participé.

Le remplacement par des appareils plus exactement adaptés peut être très rentable.

L'utilisation d'engins entraînés à *vitesse réglable* permet d'augmenter le rendement à charge partielle (pompes, ventilateurs, etc.).

4. La modification des équipements existants par l'addition de matériel thermique classique correspond à des investissements déjà notables : récupérateurs, préchauffeurs d'air, échangeurs, pompes à chaleur.
5. La reconversion d'un processus vers une forme d'énergie primaire autre que le pétrole (charbon, électricité), surtout celles qui peuvent réduire notre dépendance énergétique.

Dans tous ces domaines, les services de l'Université sont capables d'agir en conseils bien informés et le font à la demande.

5. LES RÉCUPÉRATIONS D'ÉNERGIES PERDUES

Le potentiel de récupération d'énergie est considérable.

La plus grande partie de ce potentiel correspond à la récupération de rejets thermiques. Les possibilités techniques de récupération dépendent essentiellement de quatre facteurs :

- la température de la chaleur rejetée ou mieux, son exergie ;
- la demande en chaleur du processus, du site industriel, de la région (par exemple pour le chauffage urbain) ;
- des problèmes techniques particuliers, principalement la corrosion et l'encrassement des conduits, échangeurs, etc. ;
- le temps de retour de l'investissement.

Sur tout ce front, la recherche de l'Université est présente. Signalons notamment l'étude faite par le Professeur VANDER EYCKEN et ses collaborateurs. Elle porte sur :

- les techniques de récupération en matière agricole, horticole, piscicole, aquacole et en chauffage urbain ;
- les techniques de production et de distribution de chaleur à basse température ;
- l'inventaire des industries convertibles à la récupération thermique dans un rayon de 30 à 60 km autour des centrales nucléaires.

Ces études montrent que le réchauffage des eaux résiduelles par chaudière ou par pompe à chaleur peut parfois rendre les faibles

exergies (c'est-à-dire les chaleurs à faibles températures) utilisables industriellement.

A l'Institut de Mécanique appliquée, nous avons étudié avec l'industrie :

- un turbodétendeur centripète à injection partielle pour la récupération de l'énergie de pression du gaz naturel sous pression ;
- la valorisation énergétique des frigories du gaz naturel liquéfié à un terminal méthanier.

Nous avons dans le programme national R-D Energie une recherche systématique sur la production de force motrice à partir de chaleur à moyenne et basse température par cycle de Rankine.

Pour chaque gamme de températures, nous déterminons les fluides les plus avantageux compte tenu de toutes les contraintes : propriétés thermodynamiques, stabilité, prix, toxicité, etc.

Un groupe de production combinée d'électricité et de chaleur de faible puissance (groupe TOTEM de Fiat) a été récemment installé. Un programme systématique d'investigations sera poursuivi sur ce groupe, en vue notamment de déceler toutes ses possibilités pour les exploitations agricoles.

Le Service de Mécanique appliquée a été associé à la conception, la construction ou les essais de diverses installations de production combinée d'électricité et de chaleur ou de systèmes d'énergie totale.

6. DIVERSIFICATION DES SOURCES : LES ÉNERGIES ALTERNATIVES

Charbon

Le secteur du charbon n'a jamais été abandonné par le Professeur Cypres et son équipe, qui expose *infra* le problème de la "Valorisation chimique du charbon".

La technologie de la combustion en lit fluidisé a un grand intérêt pour valoriser le potentiel énergétique des schistes des terrils et des rejets des triages-lavoirs des mines de la Campine.

Plusieurs équipes de l'Université s'y intéressent et y ont déjà consacré certains travaux, notamment M. Masson, au Génie chimique, M. Cypres et ses collaborateurs, et enfin l'Institut de Mécanique appliquée qui porte une attention particulière à la combustion en lit fluidisé sous pression, seule voie d'approche pour l'utilisation de la turbine à gaz

avec un combustible solide de basse qualité avec une température qui convient à ce type de machine.

Pour terminer dans le domaine du charbon, l'Université est évidemment présente dans la Commission scientifique de l'INIEX pour la gazéification sous pression du charbon.

Energie solaire

D'une part, les Professeurs Nasielski et Vanderdonck travaillent à la mise au point de cellules photovoltaïques basées sur la photoélectrochimie de polymères organiques.

Le Professeur Bougard, à Mons et à Bruxelles, poursuit de multiples travaux sur la captation de l'énergie solaire, son accumulation et son utilisation. Toute une série de travaux de fin d'études ont été consacrés à ces sujets durant les dernières années.

C'est dans ce cadre qu'à l'Institut de Mécanique appliquée, M. Didier Vokaer poursuit la mise au point d'une machine frigorifique à piston libre fonctionnant selon le cycle de Rankine, avec trois sources de chaleur : l'énergie solaire, l'ambiance, la source froide. Une telle machine serait particulièrement adaptée à la conservation des denrées alimentaires en région tropicale.

Bioénergie

Le Service de Botanique du Professeur Duvigneaud travaille à définir une agriculture repensée, source non seulement de ressources alimentaires mais fournissant aussi énergie et matières premières à une industrie rénovée.

C'est en fait la construction d'un *écosystème* de demain, pensé comme potentiel alimentaire, énergétique et source de matières premières.

Energie éolienne

Une éolienne à axe vertical a été réalisée cette année dans le cadre d'un travail de fin d'études.

Centrales thermiques classiques et nucléaires

A l'Institut de Mécanique appliquée, nous poursuivons une étude sur l'élargissement des sites de fonctionnement des centrales thermiques en

utilisant des cycles consommant moins d'eau ou pas d'eau du tout. Il s'agit de cycle binaire : vapeur d'eau-ammoniac ou fréons. Le cycle basse pression comporte un réfrigérant sec en place des tours de réfrigération humides.

CONCLUSIONS

Ce bref exposé vous a montré que la recherche de l'Université est résolument engagée dans les problèmes de l'utilisation rationnelle de l'énergie et par là insérée dans un des grands problèmes de la vie sociale actuelle.

Je n'ai pas été complet. J'aurais pu vous parler de la recherche que MM. VAN ECK et MAGETTO poursuivent sur la voiture électrique, de la thèse de M. Philippe MORTIER sur le traitement des sables bitumineux, etc.

Les recherches signalées sont souvent effectuées sous contrats.

Les principaux viennent de la C.E.E., du programme de R-D Energie de la CIPS, de la Province du Brabant, du GEBEG et, bien entendu, de l'industrie privée.

Les sommes injectées par les pouvoirs publics en vue de l'utilisation rationnelle de l'énergie sont insuffisantes. Elles nous placent dans le peloton arrière de la Communauté avec l'Italie et l'Irlande.

Paradoxalement l'objectif global Energie est bien doté dans la recherche scientifique mais la part prépondérante est consacrée à la finalité nucléaire.

Il faudrait diversifier en privilégiant la recherche vers les économies, les récupérations et les développement des sources alternatives.

Je n'ai pas traité de l'enseignement. Le Professeur Jean MICHOT introduira la licence interfacultaire en Sciences, techniques et gestion de l'énergie.

La licence sera nettement interdisciplinaire.

En terminant, j'attire votre attention sur le fait que les recherches dont j'ai esquissé les grands axes sont couvertes par des économistes, des physiciens et chimistes, des ingénieurs.

Avec la nouvelle licence, avec ses orientations de recherche dans le domaine de l'énergie, l'Université participe activement à un des problèmes primordiaux de l'économie actuelle : la définition d'une politique énergétique au niveau de la communauté belge comme à celui de l'entreprise et même à celui de la cellule familiale.

la licence spéciale interfacultaire en sciences, techniques et gestion de l'énergie

Certains de nos collègues de la Faculté des Sciences et de la Faculté des Sciences appliquées s'appuyant sur le succès remporté par la licence interfacultaire en Environnement, concluaient à l'opportunité, voire à la nécessité de la mise en œuvre d'un enseignement interdisciplinaire sur certains sujets d'actualité se rapportant à des questions intéressant le devenir de notre société. Ils soulignaient qu'à leur avis, il s'imposait d'envisager sur cette base la création d'un enseignement centré sur les aspects scientifiques, médicaux, techniques, économiques, politiques et juridiques du problème de l'énergie.

Leur impression est rapportée dans cet extrait d'une lettre que m'adressait notre collègue J. Reisse, que je voudrais remercier ici de la part active et clairvoyante qu'il a prise dans l'élaboration de ce projet :

«Le problème de l'énergie, soulignait-il, est quasi certainement le problème majeur qui se posera à nous dans le dernier cinquième du 20^e siècle. Il s'agit typiquement d'une question aux facettes multiples qui implique, pour pouvoir être abordée avec succès, une formation interdisciplinaire.

Par ailleurs, il ne fait pas de doute que nous aurons le plus grand besoin de «spécialistes en énergie». Ces spécialistes seront des scientifiques mais ce seront aussi et peut-être surtout des «gestionnaires de l'énergie» ; c'est-à-dire des économistes ayant une formation scientifique suffisante, des scientifiques formés en économie politique. Il faudra surtout des universitaires qui soient à même d'intégrer des informations très diverses et qui puissent, par exemple, mettre en balance les «risques» liés au développement du nucléaire avec les «risques» liés à une modification de régime politique en Arabie Saoudite.

Comme dans tout problème à composante politique importante, l'option philosophique de départ influencera le choix des solutions adoptées.

L'ampleur du problème de l'énergie pour notre pays et pour le monde industrialisé justifie que l'U.L.B. libre-exaministe se préoccupe de la formation de ceux qui devront contribuer à trouver les solutions de ce problème».

La Commission de l'enseignement de juin 1979 décidait de mettre la question à l'étude et confiait cette mission à notre collègue J. Reisse.

Le groupe de travail, composé de membres des Facultés des Sciences, des Sciences Appliquées, des Sciences Sociales, Politiques et Economiques, des Sciences Psychologiques et Pédagogiques et de l'Ecole de Commerce, s'est réuni une dizaine de fois dès octobre 1979.

Le problème de l'énergie est incontestablement très important pour tous les pays industrialisés. Il présente une acuité particulière en Belgique, particulièrement dépendante de l'étranger pour ses approvisionnements.

Depuis de nombreuses années, plusieurs groupes de recherche de notre Université déploient une activité soutenue dans des domaines qui ont trait à divers aspects de nos préoccupations en matière d'énergie.

Les conditions étaient donc réunies pour que l'ULB contribue à la recherche des solutions aux problèmes auxquels doit faire face notre pays et s'interroge sur la meilleure façon de s'associer utilement à la formation de ceux qui auront à prendre les décisions en matière de politique énergétique. Il ne pouvait être question d'envisager la mise sur pied d'une année de post-graduat de spécialisation dans les seuls aspects techniques liés à l'énergie. Le programme aurait sans aucun doute été mal équilibré compte tenu de l'objectif à atteindre.

Seule, la création d'une licence interfacultaire, donc interdisciplinaire, devait être envisagée. Il est en effet indiscutable que les questions liées aux problèmes de l'énergie tels qu'ils se posent aujourd'hui, présentent un caractère interdisciplinaire. Personne ne peut nier que les arguments politiques, économiques, sociaux, psychologiques, scientifiques et techniques sont intimement liés dans toute définition d'une politique en matière d'énergie. L'objectif ne peut dès lors se concevoir qu'au travers d'une formation d'hommes et de femmes capables de participer à l'élaboration de cette politique et ceci que ce soit au niveau de l'entreprise, de la commune, de la région, de l'Etat ou encore au niveau supranational.

Il est certain, au surplus, qu'une seule personne ne peut cumuler toutes les compétences requises. Seul un groupe est habilité, par une approche interdisciplinaire, à s'attaquer à de telles tâches.

La licence interfacultaire est dès lors la meilleure solution pour autant qu'elle ne se contente pas de donner une culture superficielle dans tous les domaines et qu'elle rencontre trois préoccupations :

- donner aux étudiants la formation indispensable pour qu'un dialogue fructueux soit possible entre personnes de formations différentes,
- leur donner l'habitude d'une argumentation différente de celle qu'ils ont entendue au cours de leurs études plus spécialisées antérieures,
- leur enseigner les moyens et les méthodes du travail en groupes interdisciplinaires.

L'enseignement universitaire traditionnel ne prépare que peu à l'interdisciplinarité. La licence interfacultaire doit donc, préalablement, envisager de combler cette lacune. C'est le but d'une première série de cours, les «*cours passerelles*».

Les étudiants admis de plein droit à la licence interfacultaire appartiendront à l'une des trois filières : Sciences, Sciences appliquées ou Sciences économiques, sociales et politiques. Les cours passerelles visent à une homogénéisation de base de leurs connaissances.

Après avoir reçu ces premiers cours dans des domaines qui ne leur sont pas familiers, les étudiants devront être à même de suivre avec profit les «*cours communs*». Pour la plupart, ils se donneront sous forme de séminaires. Ces cours seront l'occasion pour tous les étudiants, quelle que soit leur formation d'origine, de s'initier à des aspects très importants en matière d'énergie. Ils seront aussi l'occasion d'un dialogue enseignants-enseignés qui devrait faire apparaître les avantages, mais aussi les difficultés, de l'approche interdisciplinaire.

Enfin, les étudiants devront suivre des «*cours de spécialisation*». Il s'agit de cours à option, accessibles en principe à tous les étudiants, mais il est probable que la plupart d'entre eux, compte tenu de leur niveau de spécialisation, choisira parmi ces cours, ceux qui correspondent le mieux à leur formation antérieure.

L'année se terminera par un travail de fin d'étude qui sera réalisé nécessairement par des groupes d'étudiants issus de filières différentes. Ce sera là l'occasion d'aborder sur le terrain, l'examen d'un problème complexe dont la solution implique le recours à la démarche interdisciplinaire, la collaboration entre spécialistes ayant des formations différentes, mais abordant ensemble un problème à composantes multiples.

La Licence Interfacultaire est ouverte de plein droit aux porteurs d'un diplôme d'Ingénieur Civil, d'Ingénieur Commercial, de Licencié

en Sciences Economiques, d'Ingénieur Agronome, de Licencié en Sciences Chimiques, de Licencié en Sciences Physiques, de Licencié en Sciences Géologiques et Minéralogiques délivré par une université. Les porteurs d'un autre diplôme d'enseignement supérieur peuvent également solliciter leur admission mais celle-ci n'est acceptée qu'après examen, par une commission compétente, d'un dossier établi par le candidat et faisant apparaître les motivations et (ou) les caractéristiques de la formation antérieure (y compris professionnelle) qui permettent d'augurer une réussite à l'épreuve. Des cours complémentaires pourraient être imposés à ces candidats issus de filières autres que celles explicitement citées ci-dessus.

Les candidats qui ne remplissent pas les conditions précédentes, peuvent solliciter leur inscription à certains des cours de la Licence Interfacultaire. Ils recevront un certificat stipulant les cours suivis.

La licence spéciale interfacultaire «Energie» pourra être offerte parmi les options pour les étudiants ayant suivi la première année de la licence interfacultaire en Environnement. A l'issue de cette deuxième année, option énergie, ces étudiants auront le choix quant au titre qu'ils désirent se voir attribuer : soit licencié spécial en sciences de l'environnement, soit licencié spécial en Sciences, techniques et gestion de l'énergie.

Par ailleurs, et ainsi que cela se pratique pour la licence interfacultaire «Environnement», les étudiants de la licence interfacultaire «Energie» pourront fractionner leurs cours et obtenir les crédits correspondants, en particulier ceux qui sont engagés dans la vie professionnelle.

Compte tenu des conditions qui sont celles dans lesquelles l'Université vit aujourd'hui, l'effort que réalise notre communauté pour adapter son enseignement aux besoins exprimés, doit être souligné. Plusieurs cours, et tout spécialement ceux à caractère multidisciplinaire, ont dû être créés. Citons, par exemple :

- Questions de psychologie appliquées à l'énergie,
- Histoire économique de l'énergie y compris les aspects sociologiques,
- Aspects géopolitiques de la production et de l'approvisionnement en énergie,
- Analyse des risques et coûts sociaux liés aux différentes formes d'énergie,
- Aspects techniques et économiques de la production, du transport, de la distribution de l'énergie en Belgique,

- Aspects techniques et économiques du charbon et de ses dérivés,
- Analyse énergétique des produits et procédés industriels.

Nous pensons depuis longtemps qu'il est nécessaire que l'Université s'attaque aux problèmes ressentis comme primordiaux par la population et les hommes politiques qui la représentent. Cette attitude est la seule susceptible d'insérer mieux encore l'Université dans la société, mais c'est aussi la seule qui permette à l'Université, à ses membres, à ses diplômés, de contribuer à la définition d'une politique cohérente et réfléchie.

Il était pour nous essentiel de participer à la mise en œuvre des solutions qui conditionnent notre avenir à moyen terme.

En offrant l'enseignement de la licence interfacultaire «Energie», nous pensons y avoir utilement contribué.

possibilités et limites de l'énergie solaire

Il ne se conçoit plus aujourd'hui de parler d'énergie sans au moins mentionner les énergies nouvelles, appelées aussi non conventionnelles ou encore énergies de remplacement.

Cette dernière appellation me semble la plus judicieuse tant il est vrai que depuis 1973 la regain d'intérêt pour ces énergies est lié au souci de diversification des sources d'énergies et principalement au remplacement du pétrole.

Parmi toutes les énergies non conventionnelles possibles, l'énergie solaire joue un rôle particulier et dominant pour deux raisons : premièrement à cause de son caractère non polluant et renouvelable et deuxièmement et surtout à cause de l'énormité de son apport énergétique potentiel disponible.

A l'échelle mondiale, ne citons qu'un seul chiffre. L'ensemble des ressources estimées et cumulées d'énergie fossile (tourbe, lignite, charbon, gaz naturel, pétrole, schiste bitumeux, etc.) exploitables avec les techniques actuelles est équivalent à l'énergie solaire incidente sur la surface terrestre pendant 5 jours. Il n'est dès lors pas étonnant qu'une telle puissance, même exploitée avec un rendement inférieur à 1/10000 a suffi à assurer tous les besoins énergétiques et alimentaires de l'humanité jusqu'à il y a un siècle et, encore aujourd'hui, pour la majeure partie de celle-ci.

Pour la Belgique, pays peu favorisé au point de vue climatique, très industrialisé et à haut niveau de vie, l'énergie solaire annuelle disponible représente encore plus de 50 fois la consommation énergétique actuelle totale.

Si on se limite à n'utiliser que la surface des toits, on dispose encore d'une puissance moyenne de 3000 MW soit 36 MTEp par an, ce qui représente encore le double de la consommation du secteur domestique.

Les mouvements astronomiques relatifs de la terre par rapport au soleil provoquent des variations prévisibles, saisonnières et diurnes, du rayonnement incident auxquelles s'ajoutent des fluctuations imprévisibles dues à l'atmosphère.

Celle-ci réfléchit, diffuse et absorbe le rayonnement solaire extra-terrestre dont l'irradiance est constante (1350 W/m^2) de sorte que, au niveau de sol, le rayonnement solaire est fortement atténué en intensité, un peu plus de 1000 W/m^2 dans les meilleures conditions, est sujet à des fluctuations importantes au cours de la journée, voit sa répartition spectrale altérée et possède deux composantes : le rayonnement direct qui a gardé la direction du soleil et le rayonnement diffus.

La figure 1 montre la distribution annuelle de l'irradiation solaire mensuelle directe et diffuse en Belgique.

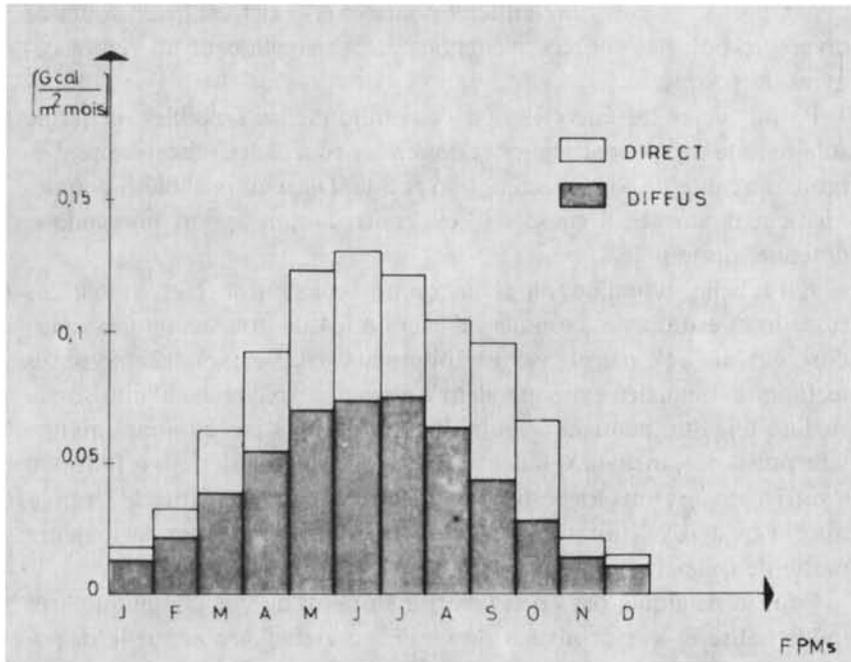


FIG 1. – Energie moyenne recue mensuellement en Belgique par mètre carré de surface horizontale

L'énergie solaire souffre de ce caractère essentiellement variable, qui nécessitera des possibilités de stockage, et de sa dilution. La puissance

moyenne est de 110 W par m² en Belgique. Elle est cependant partout disponible et, quoiqu'on pense, assez équitablement répartie sur la planète, sans aucune comparaison possible avec la concentration géographique des sources conventionnelles d'énergie.

L'énergie solaire est donc, par essence, bien adaptée à des besoins modérés et peu concentrés, ce qui correspond à la majeure partie de la consommation du secteur domestique dans les pays industrialisés et de pratiquement tous les besoins des pays en voie de développement.

Dans l'état actuel des techniques, il n'y a donc pas concurrence possible, dans les pays industrialisés, entre l'énergie solaire et l'énergie produite de façon centralisée (centrales électriques, ...) à partir des sources fossiles.

Un déplacement progressif des sources conventionnelles vers les énergies nouvelles est prévisible dans le secteur domestique et agro-alimentaire.

CONVERSION

L'énergie solaire, qui est du rayonnement thermique à haute température, environ 5800 K, peut être convertie en chaleur à basse, moyenne et haute température, en énergie mécanique ou électrique ou en énergie chimique, c'est-à-dire sous forme de liaisons interatomiques ou intermoléculaires.

La conversion peut s'opérer naturellement, ce qui conduit aux sources naturelles bien connues telles l'énergie thermique de l'air, l'énergie thermique des mers, l'énergie éolienne, l'énergie hydraulique et la biomasse, résultat de la photosynthèse naturelle, processus initial qui a conduit aux énergies fossiles que nous consommons actuellement à une cadence accélérée.

Les conversions naturelles sont caractérisées par un faible rendement, de l'ordre du pourcent pour l'agriculture, et l'absence pratique de contrôle. Leur potentiel est par ailleurs plus faible que celui du rayonnement solaire incident, direct ou diffus.

Le but de la recherche solaire actuelle est de développer des procédés de conversion contrôlés, de bons rendements et économiques.

Beaucoup reste à faire.

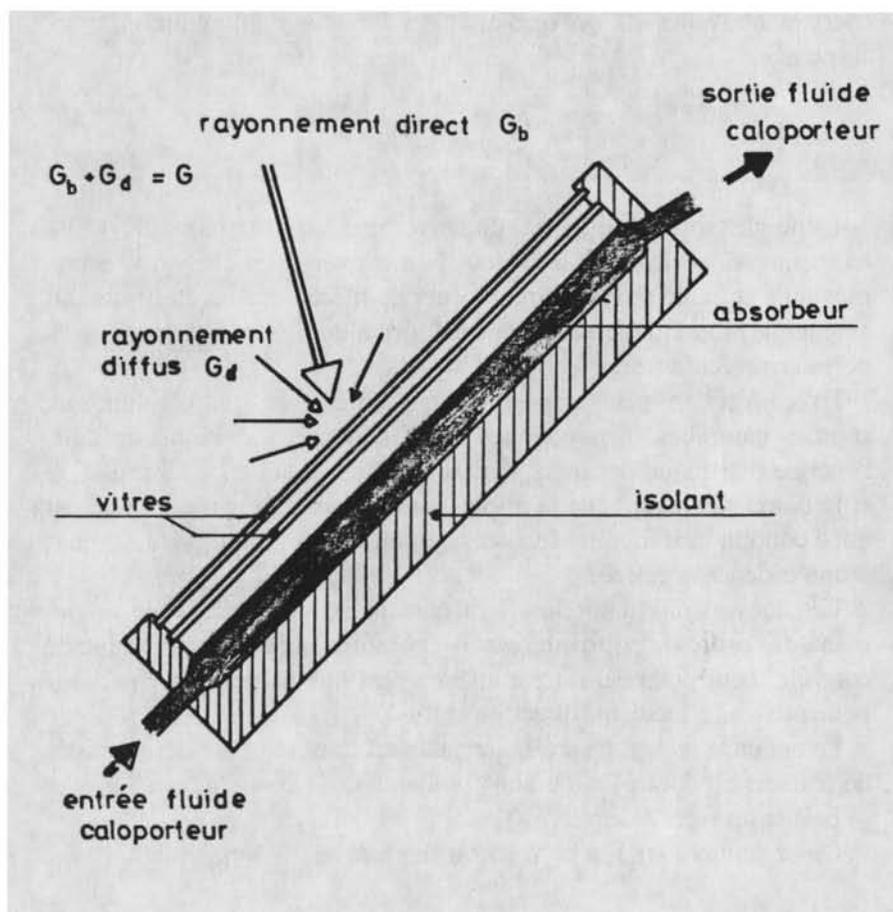
On se limitera ici à la conversion thermique.

CONVERSION THERMIQUE À BASSE TEMPÉRATURE

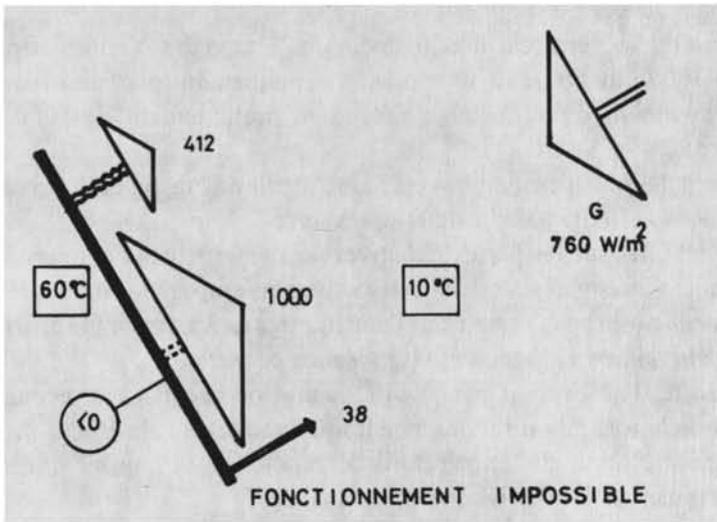
La conversion de l'énergie solaire en chaleur à basse température, de 20 °C à 100 °C, est facilement obtenue avec des collecteurs plans, fabriqués et commercialisés en Belgique depuis plusieurs années.

La figure 2 montre le schéma d'un tel collecteur. Il comprend quatre parties principales : la couverture transparente, en général en verre, l'absorbeur, le circuit du fluide caloporteur, le plus souvent de l'eau ou de l'air, et l'isolation arrière et latérale.

COLLECTEUR PLAN A DOUBLE VITRAGE



ABSORBEUR NORMAL NON COUVERT



COLLECTEUR PLAN NORMAL A UNE VITRE

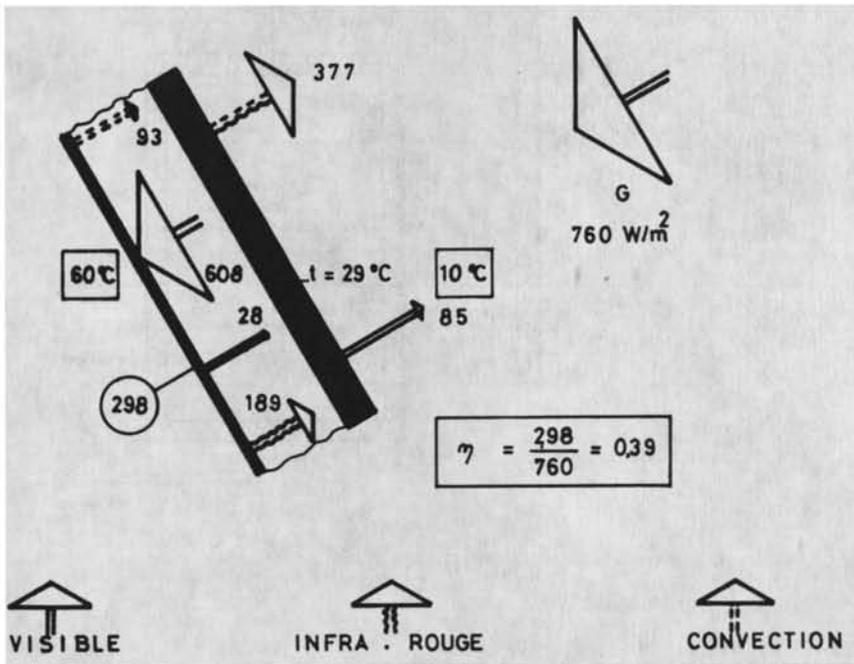


FIG. 3.

Le rayonnement solaire incident couvre une plage de longueurs d'ondes inférieures à 3000 nm pour lesquelles la transmission énergétique globale du verre est supérieure à 85 %.

Par contre, le verre est opaque pour les longueurs d'ondes supérieures à 3000 nm. Or, le rayonnement thermique émis par l'absorbeur est un rayonnement infra-rouge s'étendant pratiquement de 5000 à 20000 nm.

Il en résulte que l'ensemble verre-absorbeur est un piège à rayonnement dont l'effet net s'appelle effet de serre.

Outre cet effet sur les pertes radiatives de l'absorbeur, la couverture vitrée limite également les pertes convectives en empêchant un contact direct entre l'absorbeur et l'air ambiant. La figure 3 montre la répartition de l'énergie en l'absence et en présence de vitre.

Par contre, l'absorption par la vitre d'une partie du rayonnement visible et de la totalité du rayonnement infra-rouge de l'absorbeur provoque une élévation de température de celle-ci, avec comme conséquence des pertes convectives vers l'ambiance.

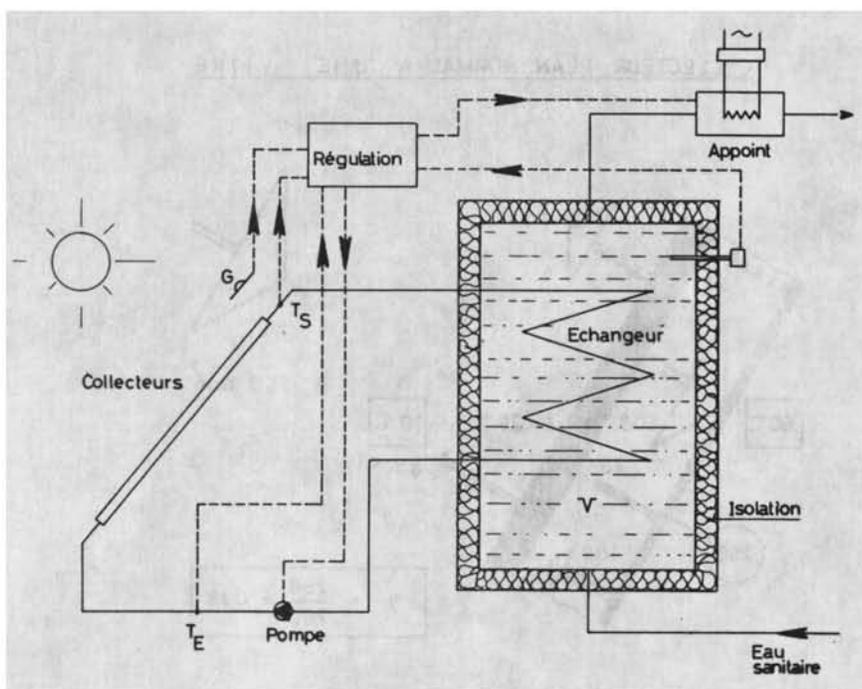


FIG. 4.

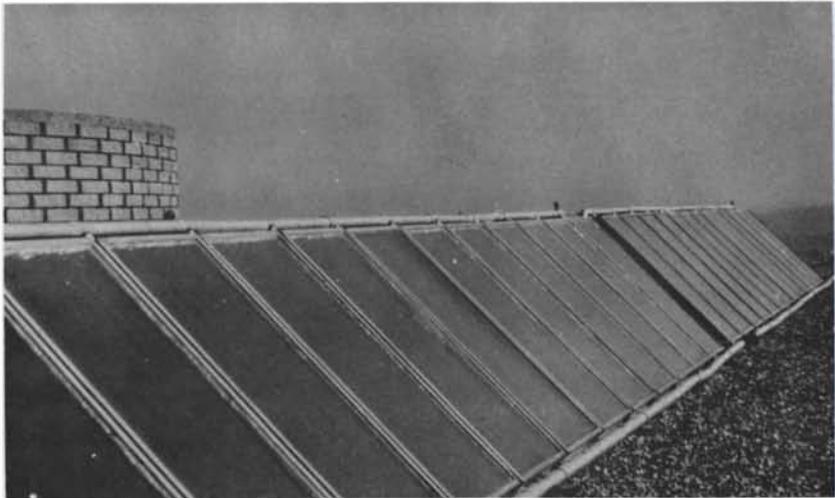


FIG. 5.

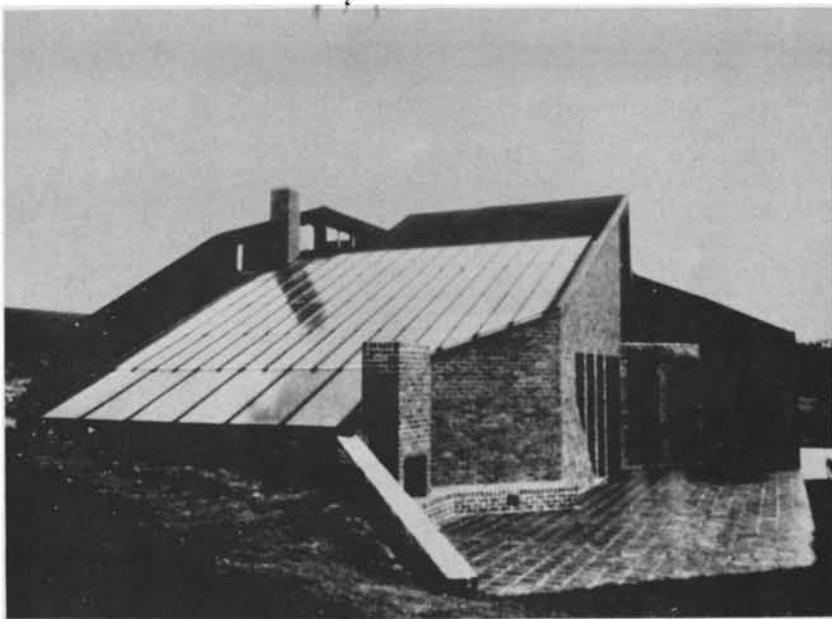


FIG. 6.

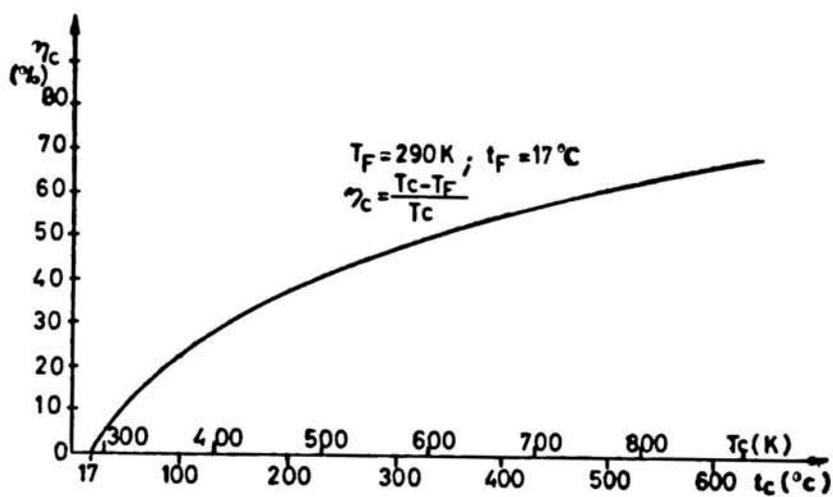


Fig. 7. - Variation du rendement de Carnot avec la température de source chaude.

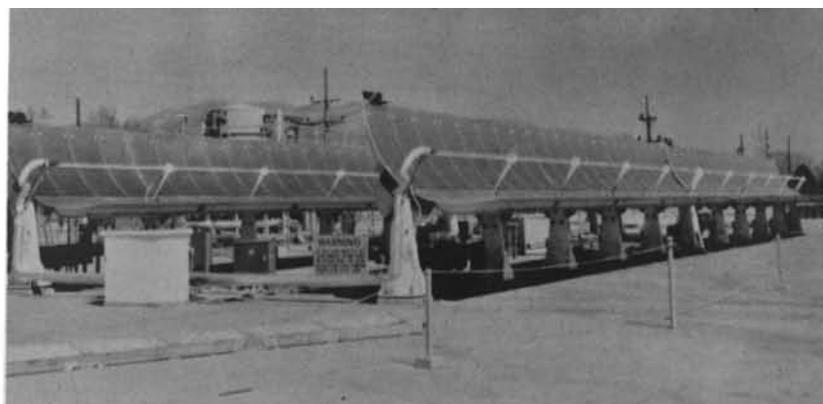


FIG. 8.

Il en résulte que le rendement thermique global du collecteur est une fonction décroissante de la température d'utilisation : température moyenne du fluide dans le collecteur. Le rendement est maximum, 70 à 80 %, au voisinage de l'ambiance et nul pour une température de 80 à 150 °C selon les collecteurs.

Les applications accessibles à ce type d'appareils couvrent dès lors le secteur domestique et tertiaire (chauffage des piscines, de l'eau sanitaire en logements groupés ou individuels et le chauffage des locaux), le secteur agricole (chauffage des serres, séchage) et une partie du secteur industriel agro-alimentaire.

La figure 4 montre, par exemple, le schéma d'un chauffe-eau solaire tandis que les figures 5 et 6 montrent respectivement l'installation solaire de production centralisée d'eau chaude sanitaire de l'Ecole Hôtelière de Namur et une maison solaire en Brabant.

Le rendement de conversion en Belgique est en moyenne de 30 %. Une utilisation, raisonnablement encouragée par les pouvoirs publics dans le secteur résidentiel, pourrait conduire, vers l'an 2000, à une économie sur l'importation de fuel de l'ordre de 2 %.

Dans les pays en voie de développement, les applications les plus importantes sont le séchage, la production d'eau potable par distillation des eaux saumâtres et la réfrigération solaire.

L'Institut de Mécanique Appliquée de l'U.L.B. a fait, depuis quelques années, quelques travaux dans le domaine du dimensionnement des installations solaires, des collecteurs solaires à température modérée et de la réfrigération solaire.

CONVERSION À MOYENNE ET HAUTE TEMPÉRATURE

Des températures élevées peuvent être obtenues par concentration optique.

Une conversion thermodynamique permet alors la production d'énergie mécanique puis électrique. Le rendement de cette conversion est naturellement limité par le rendement de Carnot, représenté sur la figure 7.

La gamme des températures moyennes, 100 °C à 350 °C, conduit à des installations de production d'électricité de 10 à 100 kW. Une telle installation expérimentale est représentée à la figure 8.

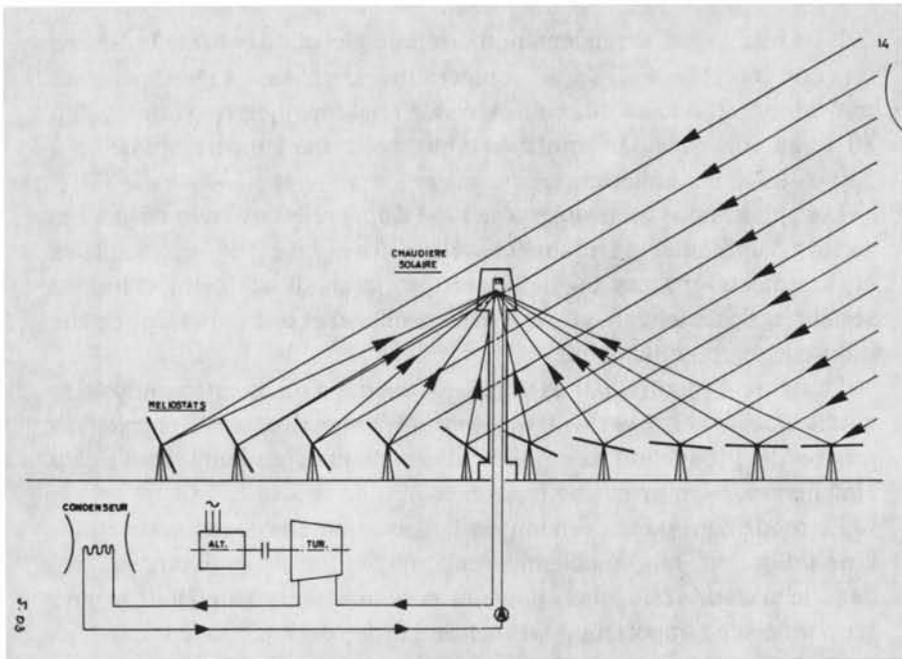


FIG. 9. – Schéma d'une centrale solaire «type tour».

Enfin, la figure 9 montre le principe d'une centrale solaire à tour où des milliers de mètres carrés de miroirs mobiles, appelés héliostats, concentrent la lumière en un point fixe situé au sommet d'une tour et permettent d'obtenir à la fois des températures élevées, dépassant facilement $600\text{ }^{\circ}\text{C}$, et des grandes puissances, de l'ordre de 1 à 10 MW électriques, avec des rendements de l'ordre de 20 %.

Ces centrales sont aujourd'hui au stade expérimental et nous n'en serons certainement pas les utilisateurs. Cependant, l'industrie belge participe à leur étude et leur réalisation dans le cadre des programmes internationaux de recherche.

Ce sont en effet des machines très sophistiquées dont la construction est accessible seulement à des pays industrialisés et dont le marché potentiel est estimé à des milliers de milliards de francs.

Une nouvelle branche industrielle axée sur l'énergie solaire et les énergies non-conventionnelles est, en fait, en train de naître.

le photovoltaïsme

Les aspects généraux et les possibilités thermiques de l'énergie solaire étant examinés par mon collègue le professeur Bougard, j'aborderai directement le photovoltaïsme. En tant que fait expérimental, le photovoltaïsme est connu depuis plus de 100 ans. Si l'on dispose de deux substances ayant un travail d'extraction des électrons différent et que l'on réalise un contact intime entre ces deux substances, il existe dans la zone de la jonction un champ électrique. Si le nombre de porteurs de courant, positifs et négatifs, augmente sous illumination, l'excès des porteurs sera séparé dans le champ électrique et ce sera l'origine du photocourant et de la phototension.

Il existe donc deux approches conceptuellement différentes pour transformer l'énergie solaire en énergie électrique ; celle qui nécessite normalement la concentration de la lumière de manière à obtenir une haute température pour produire une vapeur servant à entraîner une turbine et un alternateur. C'est une approche, qui, dans le cas des centrales à tour, n'est concevable que pour des puissances comprises entre 1 et 100 MW électriques. En ce qui concerne le photovoltaïsme de tels facteurs d'échelle n'existent pas ; un panneau d'un m² de cellules au Si telles qu'on les commercialise actuellement, placé horizontalement fournira en Belgique, dans de bonnes conditions d'insolation, une puissance d'environ 100 W_{elec}. La puissance disponible varie linéairement avec la surface exposée ; elle ne dépend pas du caractère diffus ou direct de la lumière.

Cependant, actuellement, le photovoltaïsme n'est utilisé que pour des applications très limitées et ce, pour des raisons économiques. Ceci n'a rien de surprenant, les cellules commercialisées ont été conçues dans le cadre des programmes spatiaux. Pour ces applications, il importe surtout d'obtenir des systèmes ayant un rendement élevé, une grande fiabilité, un faible poids par unité de surface, le coût de production n'étant qu'un facteur secondaire. Actuellement, on réalise en laboratoire des cellules au silicium monocristallin ayant un rendement de 18 à 19% ; la fiabilité est excellente puisque des panneaux installés il y a

près de vingt ans donnent toujours satisfaction ; le coût du kWh photovoltaïque est 30 à 50 fois plus élevé que celui du kWh électrique produit par les voies classiques. Selon le Département pour l'Energie des Etats-Unis, ce coût devrait cependant diminuer d'un facteur 40 d'ici une dizaine d'années. Ceci se fera par une série d'étapes que le temps ne permet pas de discuter ici.

Il n'en reste pas moins vrai qu'aujourd'hui, il est encore impossible de prévoir de quoi et comment sera réalisée la cellule qui sera satisfaisante sur le plan économique. Un grand nombre de conceptions différentes par la nature des matériaux, par leur forme et par le type de jonction sont possibles. Quelques unes sont reprises dans le tableau ci-après.

MATÉRIAUX

Si, GaAs, InP, CdTe, AlSb, CdSe, GaP, CdS, Cu₂S ...

Substances organiques.

ÉTAT

Monocristal, polycristal, amorphe.

STRUCTURE

Jonction p-n, homo- ou hétérojonction, barrière de Schottky, contact liquide-solide.

SYSTÈMES

Avec ou sans concentration.

STOCKAGE

Batteries, pompage, super-volants, H₂ ...

Actuellement, l'effort de recherche principal porte sur le silicium. Cependant, d'autres semi-conducteurs présentent certains avantages par rapport à cet élément. L'arséniure de galium conserve des propriétés extrinsèques dans un domaine de température bien plus important que le silicium. Il convient donc parfaitement pour les systèmes à concentration. Le couple CdS-Cu₂S est particulièrement facile à mettre en œuvre ; de grandes surfaces pouvant être réalisées par vaporisation. Comme des films minces suffisent, la cellule au sulfure de cadmium pourrait être largement développée dans l'avenir. Les rendements obtenus sont à présent d'environ 8%. Les facteurs coût et rendement ne sont cependant pas les seuls à considérer, des aspects politiques doivent

également intervenir. Le silicium de qualité métallurgique est accessible à toutes les nations, il n'en va pas de même pour des éléments tels que l'indium, le cadmium ou le galium. De plus, si l'on veut, par le photovoltaïsme, générer des quantités d'électricité significatives à l'échelle d'un pays industriellement développé, des tonnages importants de semi-conducteurs devront être mis en œuvre et l'on peut s'attendre à ce que des mouvements écologiques s'opposent dans ce cas à la généralisation de systèmes à base de cadmium.

Il n'existe pas de raison fondamentale pour que des cellules solaires à haut rendement ne puissent pas être réalisées à partir de substances organiques; Ces questions sont examinées à l'Université de Bruxelles dans les laboratoires du professeur R. Deltour et dans le mien. Nous avons récemment étudié les propriétés électriques d'un polymère organique, la polyvinylpyridine- I_2 (PVP- I_2) et examiné la possibilité de réaliser une hétérojonction PVP- I_2 - SnO_2 . Les rendements sont encore modestes.

Actuellement, les propriétés électriques du polyacétylène sont étudiées et nous sommes à même de préparer ce semi-conducteur sous les formes n et p. Les propriétés de jonctions p-n à base de polyacétylène feront bientôt l'objet d'examens.

Si les monocristaux permettent l'obtention des rendements plus grands que les systèmes polycristallins, ces derniers ont l'avantage d'un coût de production moins élevé. Les systèmes amorphes, jusqu'il y a 5 ans n'étaient pratiquement pas envisagés dans le cadre de la transformation lumière-électricité. Mais depuis que Spear et Le Comber ont montré en 1975 que Si-a peut être dopé, la recherche ne poursuit activement dans ce domaine et il est possible que ce matériau relativement bon marché et facile à mettre en œuvre s'impose dans l'avenir. Il est clair que le photovoltaïsme est un domaine en pleine évolution, où il faut donc s'attendre à des surprises. L'extrapolation des connaissances d'aujourd'hui ne permet peut-être pas d'imaginer les cellules qui s'imposeront dans une dizaine d'années.

Un autre exemple de cette situation concerne le contact liquide-solide. Jusqu'il y a peu, ce contact faisait l'objet de travaux des électrochimistes et photo-électrochimistes et ce n'est que très récemment qu'on s'est rendu compte que des jonctions CdS ou CdSe – solution aqueuse permettaient de réaliser des cellules ayant un rendement de 9%. Ces systèmes ne sont cependant pas très stables et c'est une des lignes de force du laboratoire du Professeur J. Nasielski et de Madame

De Mesmaeker de rechercher l'origine de cette instabilité. Parallèlement à ce travail fondamental, une recherche plus appliquée se poursuit en vue de la stabilisation de ces cellules. Des résultats préliminaires obtenus avec des dérivés organiques soufrés indiquent que les espoirs mis dans ces systèmes semblent justifiés.

Je vais cependant terminer ce court exposé par une note qui semblera peut-être un peu pessimiste mais que je pense réaliste. Même si l'on disposait aujourd'hui de la cellule photovoltaïque idéale, bon marché et ayant un rendement de transformation énergie solaire – énergie électrique égal ou supérieur à 10 %, il faudrait probablement cinq années avant que celle-ci puisse être produite en grand nombre et encore cinq années avant que ces cellules puissent être installées et produire de l'énergie électrique en quantités significatives à l'échelle d'une nation industriellement active.

Il ne faut donc pas s'attendre à des miracles, ce n'est pas avant 10 ans que le photovoltaïsme pourra prendre une place autre que marginale dans notre production d'électricité.

valorisation chimique du charbon

1. INTRODUCTION

Le retour massif au charbon qui laissait bien des spécialistes des questions énergétiques sceptiques il y a quelques années encore, est actuellement un fait bien établi. L'évolution du déficit énergétique net de la Belgique depuis la première crise pétrolière en 1973, est donnée ci-dessous :

TABLEAU I
Bilan net importations produits énergétiques

DEFICIT (en milliards de francs belges)	
1973	- 40
1974	- 109
1975	- 106
1976	- 134
1977	- 123
1978	- 111
1979	- 150
1980 (Prévisions $\pm 10\%$)	- 265

Réduire ce déficit est donc le problème majeur dont devraient s'occuper, par priorité n° 1, toutes les autorités politiques, économiques et scientifiques. C'est là que gît la cause de nos difficultés économiques et financières. Les économies qu'il est certes nécessaire de faire dans d'autres domaines, apparaissent comme minimales à côté du gouffre à milliards qu'est l'importation de pétrole. Le grand problème de la chimie industrielle d'ici à la fin du siècle est de résoudre la reconversion progressive d'une économie basée sur le pétrole vers une économie où le charbon devra assurer une part qui ira en croissant au fur et à mesure que la pénurie de pétrole, réelle ou provoquée pour des raisons politiques, s'accroîtra.

Les deux voies de la valorisation chimique du charbon sont la gazéification (intégrale ou partielle) et la liquéfaction. Le charbon a une structure macromoléculaire polycyclique à caractère aromatique prépondérant. De nombreux modèles de la molécule de charbon sont donnés dans la littérature. La figure 1 reproduit un de ces modèles. En raison de sa structure polyaromatique prépondérante, la pyrolyse du charbon ne donne que peu de matières volatiles, gazeuses ou liquides, et de 70 à 80% de résidu solide, le coke. La gazéification intégrale du charbon détruit complètement la molécule de charbon, pour la transformer en CO , CH_4 et H_2 à partir desquels des synthèses diverses sont possibles. La liquéfaction du charbon est atteinte par une hydrogénolyse ménagée, qui fragmente la molécule en composés de masse moléculaire d'autant plus faible que le pourcentage d'hydrogène fixé augmente. Les ruptures se produisent principalement à l'endroit des ponts entre groupements polycycliques et à l'endroit des chaînes latérales.

Beaucoup de procédés industriels sont actuellement en voie de développement. Ils abordent techniquement la gazéification par différentes voies.

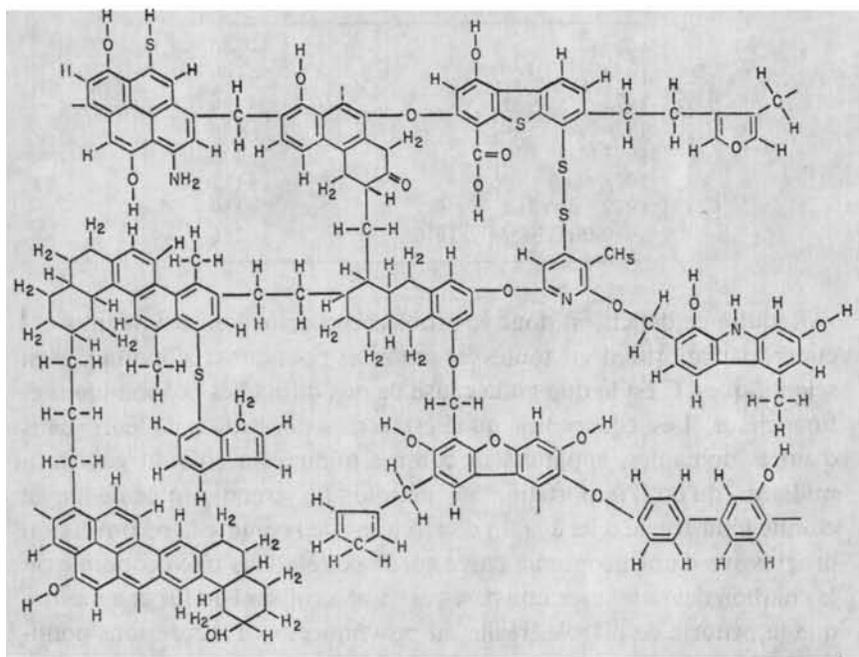


FIG. 1. - Chemical structure of coal.

2. GAZÉIFICATION

La gazéification des combustibles solides peut se faire par la réalisation des réactions de base données dans le tableau II.

TABLEAU II
Réactions de base de gazéification

	Enthalpie de réaction en kcal/mole
1. <i>Hydroréactivité</i> $C + H_2O \rightarrow CO + H_2$	31,382
2. <i>Hydrogénoréactivité</i> $C + 2H_2 \rightarrow CH_4$	- 17,889
3. <i>Méthanation</i> $CO + 3H_2 \rightarrow CH_4 + H_2O$	- 49,271
4. <i>Conversion du CO</i> $CO + H_2O \rightarrow CO_2 + H_2$	- 9,838

De nombreux procédés industriels sont déjà utilisés, comme le procédé de gazéification Lurgi à l'oxygène sous pression. D'autres sont à l'état de développement avancé. Il ne peut être question ici de les analyser tous.

La Shell a développé avec Koppers A.G., un procédé à l'oxygène à haute température dont le schéma de principe est donné dans la figure 2.

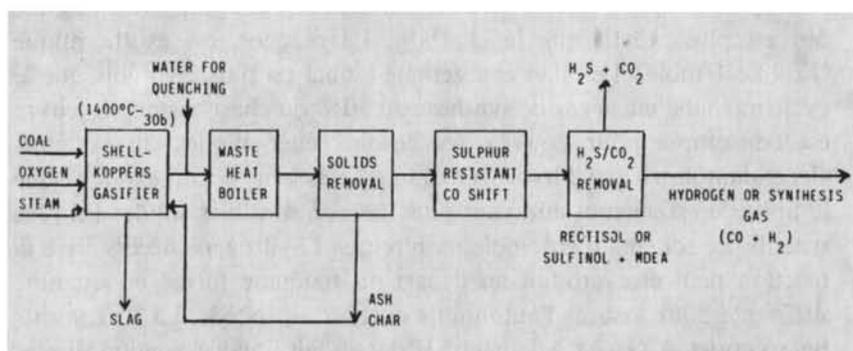


FIG. 2. — Shell koppers coal gasification process.
Typical block scheme for hydrogen or syn. gas production.

Une unité pilote de 6 t/j a fonctionné depuis 1976 à Amsterdam. Elle a été suivie d'une deuxième de 150 t/j, construite en 1978 à Harburg (R.F.A.) d'un coût de 50 millions de \$. Une unité industrielle expérimentale de 1000 t/j est prévue pour 1983-1984 qui doit permettre de construire des unités industrielles de 2500 t/j jusqu'en 1990.

Le procédé EXXON, représenté dans la figure 3, est basé sur la synthèse directe du CH_4 au cours de la gazéification du charbon par $\text{O}_2 + \text{H}_2\text{O}$, grâce à l'introduction dans celui-ci de catalyseurs alcalins, et la séparation cryogénique des gaz n'ayant pas réagi ($\text{CO} + \text{H}_2$), qui sont recyclés, et CH_4 .

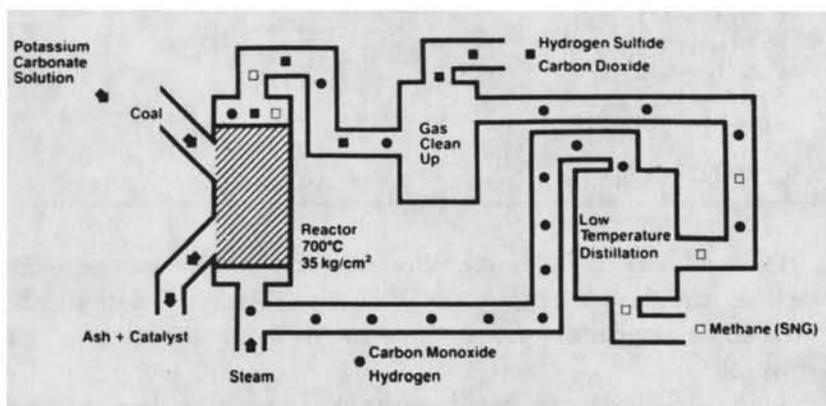


FIG. 3. — Exxon catalytic coal gasification for methane.

L'hydrogénation directe du charbon est surtout appliquée au lignite qui est plus réactif que le charbon. La réaction est exothermique (17,9 kcal/mole). Le bilan énergétique global est plus favorable que le cycle méthane via le gaz de synthèse où 30% du charbon mis en œuvre est consommé pour couvrir les besoins énergétiques du système. Cependant, la vitesse d'hydrogénation est très lente ce qui explique que le procédé est surtout attrayant pour les combustibles solides les plus réactifs. Le schéma d'ensemble montre que l'hydrogène nécessaire à la réaction peut être produit au départ du méthane formé en quantité suffisante pour assurer l'autonomie en H_2 du procédé. La RHEINISCHE BRAUNKOHLE A.G., en Allemagne Fédérale fait l'hydrogénation directe à haute température (850 à 900 °C) sous pression (50 à 70 bar) des lignites du bassin rhénan. L'unité pilote mise en service en 1977 a une

capacité de 200 kg/heure de lignite. L'unité industrielle expérimentale 10 t/h a été mise en chantier. Son démarrage était prévu dans le courant de 1980.

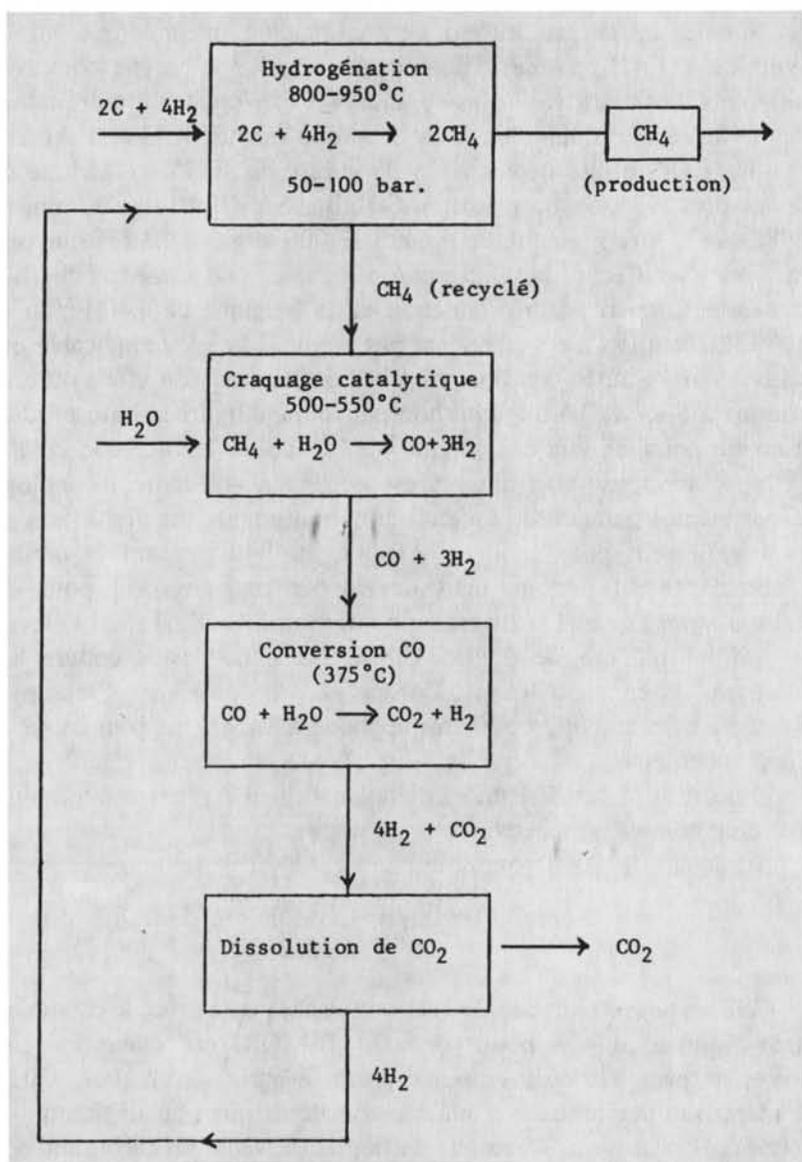


FIG. 4. - Hydrogenogazéification complète.

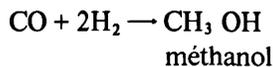
3. LIQUEFACTION DU CHARBON

3.1. Indirecte

La liquéfaction indirecte consiste à faire la synthèse des hydrocarbures liquides au départ des gaz de gazéification intégrale. Le gaz de synthèse $\text{CO} + \text{H}_2$ permet d'obtenir un grand nombre de composés différents en faisant varier les conditions expérimentales, entre autres des hydrocarbures liquides. C'est le procédé SASOL (South African Synthetic Oil) utilisé depuis avant la guerre de 40-45 en Afrique du Sud. Après 1973, on a construit SASOL II et SASOL III sera terminé en 1982-1983. A ce moment, on traitera 29.000 tonnes à 20-23 % de cendres par jour. Ceci représente environ 8 millions de tonnes de charbon par an à comparer à la production de la Belgique de 6,4 M t/an en 1979. La solution n'est cependant pas bonne. Elle n'est applicable que dans les pays où le charbon est très bon marché. En effet, on consomme à SASOL 3,5 t de charbon par tonne d'hydrocarbure produit. Tant du point de vue énergétique que du point de vue économique, cette solution est aberrante. C'est cependant la seule technologie expérimentée pendant de longues années à grande échelle. Elle a été non seulement poursuivie en Afrique du Sud pendant la période d'abondance du pétrole, mais développée intensivement pour des raisons stratégiques. Les investissements pour SASOL II et III s'élèvent à 3,5 à 4 milliards de dollars U.S.A. De plus, l'usine couvre 830 hectares ! Pour aucun pays d'Europe, le procédé Fisher Tropsch de synthèse directe d'hydrocarbures appliqué à SASOL ne peut entrer en ligne de compte.

Par contre, la synthèse du méthanol, excellent carburant automobile, offre de bonnes perspectives.

Au départ de gaz de synthèse



Celui-ci peut être hydrogéné sélectivement par le procédé catalytique (sur zéolithes) mis au point par la MOBIL OIL, en octane. Par cette voie, on peut fabriquer l'essence d'auto à partir de charbon. Quand l'adaptation des moteurs d'auto au fonctionnement au méthanol sera réalisée, on aura un 4^e réseau de points de vente de carburant pour automobiles, de méthanol à côté de l'essence, du diesel et de car gas.

Une phase intermédiaire facilement réalisable est l'incorporation, sans aucun inconvénient, de 10 à 15 % de méthanol dans l'essence.

De nombreuses usines géantes de méthanol sont en construction aux U.S.A. En Allemagne Fédérale, la Rheinbraun construit une usine qui traitera le lignite rhénan.

3.2. Directe

La liquéfaction directe du charbon est réalisée par dissolution du charbon dans un solvant donneur d'hydrogène. Le solvant, la tétraline ou un mélange des hydrophénanthrènes, agit comme agent de transfert entre l'hydrogène moléculaire dont la pression partielle dans la phase gazeuse est de plusieurs centaines d'atmosphères, et le charbon en suspension dans le solvant hydrogénant. Le procédé a été développé au British Coal Board et est industrialisé avec quelques modifications par EXXON entre autres. Le schéma d'ensemble du procédé Exxon est donné dans la figure 5. Gulf et Ruhrkohle a développé un procédé analogue Coal Solvent Refined C.S.R. I et II.

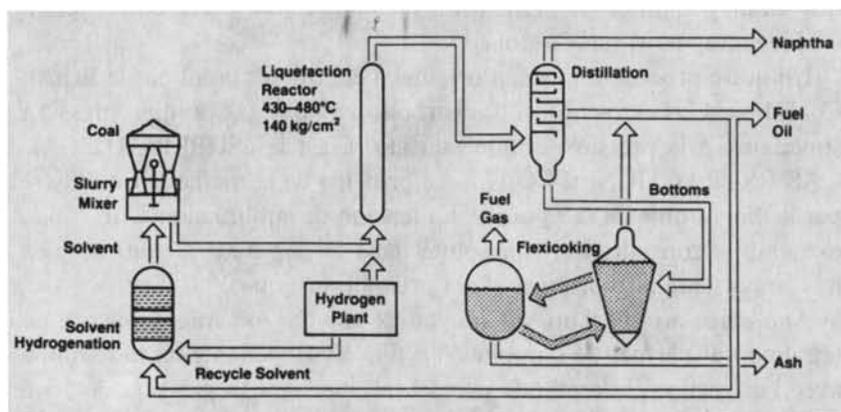


FIG. 5. - Exxon Donor Solvent Coal Liquefaction.

Le procédé a été lancé en 1976 sur une unité pilote semi-industriel de 125 t/j d'un coût de 240 millions de \$ (1978). 100 t de charbon sec donnent 4 t de L.P.G., 16 t de naphtha et 25 t de "fuel oil" soit 45 t d'hydrocarbures liquides. Exxon entreprend la construction d'une usine expérimentale de 18.400 t/j de charbon sec de l'Illinois, d'un coût de 1.600 millions de \$ (1978). Le prix de revient calculé du pétrole est

de 210 \$/t, soit 30 \$ le baril. Ceci est à peu près le prix actuel du pétrole naturel. Il est caractéristique qu'en 1978, les promoteurs eux-mêmes d'Exxon écrivaient que «210 \$/t est encore très supérieur au prix du pétrole, départ Golfe Persique». En deux ans, l'écart a disparu et l'usine n'est pas encore construite ! On considère généralement maintenant que sur le temps nécessaire à ériger, mettre progressivement en fonctionnement et optimiser les usines de liquéfaction du charbon, celles-ci seront rentables parce que le prix du pétrole, quels que soient les épiphénomènes temporels et locaux, continuera à grimper. L'exemple du port de Zeebrugge et de l'importation en 1985 de gaz liquéfié algérien illustre très bien cela. Les plans tirés sur 1985 en se basant sur les prix du gaz de 1977 ou 1978, sont des raisonnements enfantins quand on a vu, au cours de vingt dernières années, ce qu'il advient des accords et conventions pétrolières signées le plus solennellement ...

Un autre procédé de solubilisation du charbon est la SOLVENT REFINED COAL PROCESS (S.R.C. Process) de la Gulf Oil, associée à des constructeurs allemands et à la Pittsburg & Midway Coal Mining Co. Il est basé sur les mêmes principes. La mise en œuvre technologique est un peu différente. Une usine de 6.000 t/jour est en construction à Morgantown, West Virginia.

Un autre procédé tout à fait original a été mis au point par le British Coal Board : l'extraction du charbon par un gaz à une pression supérieure à la pression critique du gaz. C'est la «SUPERCRITICAL GAS EXTRACTION of COAL». Le principe de la méthode est illustré par le diagramme de la figure 6. La tension de sublimation d'un solide extractible (concentration du soluté dans le gaz d'extraction) devient très importante au voisinage de la pression critique.

Appliquée au charbon, au moyen de toluène ou mieux encore de tétraline qui permet de combiner l'action hydrogénante de la tétraline avec l'extraction, la méthode permet en abaissant la pression de 10 à 20% en-dessous de la pression critique du gaz d'extraction, de condenser la majeure partie du charbon extrait et de recycler le gaz en ne fournissant que le travail de compression nécessaire pour revenir à sa pression critique.

Une installation pilote d'extraction par des gaz surcritiques fonctionne au British Coal Research Establishment. Elle est destinée à fournir les données technologiques et économiques qui permettront d'apprécier la valeur industrielle du procédé.

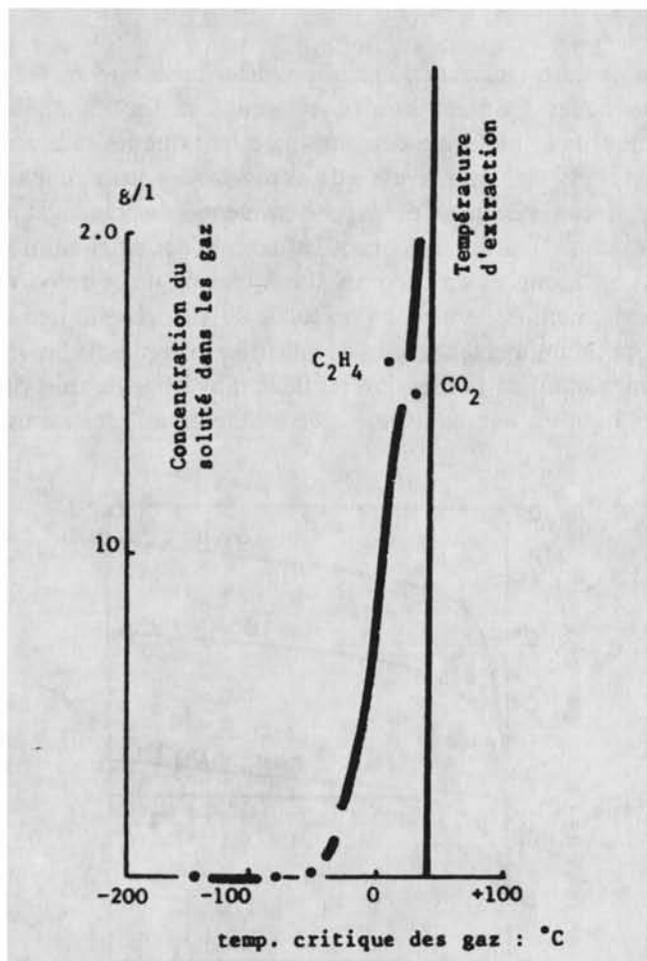


FIG. 6. - Extraction de phenanthrene par des gaz à 40 °C.

4. NOS TRAVAUX

Ces dernières années, nos travaux ont été principalement orientés vers l'étude de l'hydrogénopyrolyse, de la pyrolyse des composés polyaromatiques préalablement hydrogénés et des mécanismes de l'hydrogénation directe des carbones en CH₄.

4.1. L'hydrogénopyrolyse

La pyrolyse du charbon sous pression d'hydrogène permet de produire une quantité de matières volatiles, liquides et gaz, supérieure à la

teneur en matières volatiles du charbon, déterminée suivant les normes conventionnelles. Ceci est dû à l'hydrogénation des fragments de décomposition de la molécule de charbon, avant que les radicaux libres formés au cours de l'étape initiale de sa pyrolyse n'aient eu le temps de s'associer au cours de ce qu'on appelle conventionnellement la phase de polymérisation. Tous les facteurs qui affectent l'équilibre entre les deux processus antagonistes de décomposition thermique et de polymérisation interviennent également en présence d'hydrogène et peuvent être exploités pour augmenter le taux de volatilisation. Elle est favorisée par une augmentation de la pression partielle d'hydrogène, une vitesse de chauffage rapide à température élevée et une granulométrie très fine.

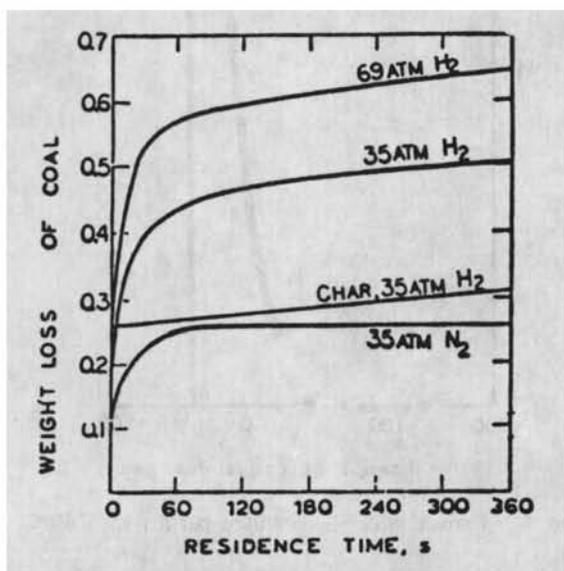


FIG. 7. — Effect of Time and Hydrogen Pressure on Weight Loss During Pyrolysis and Hydrolysis of a Pittsburgh Seam No. 8 Bituminous Coal. Final temperature in all runs, 927 °C. All samples mildly air-pretreated, char refers to high-temperature pyrolysis char. (Johnson, 1974).

La dévolatilisation du charbon se produit très rapidement ainsi qu'on peut le voir dans les courbes de la figure 7. On voit que la majeure partie de la dévolatilisation est réalisée après 1 à 2 minutes, alors que l'hydrogénation du coke résiduel se poursuit lentement, avec une

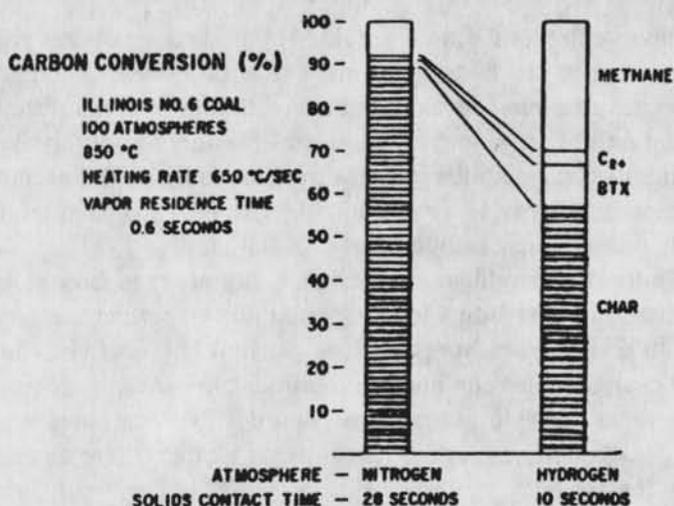
vitesse donnée par le coefficient angulaire de la partie rectiligne des courbes.

Le rapport entre les fractions gazeuse et liquide des matières volatiles produites dépend de la température et de la vitesse de chauffage. Certains travaux ont développé des méthodes de chauffage ultra rapides : c'est l'hydrogénopyrolyse éclair «Flash Hydropyrolysis». Les possibilités de cette méthode sont illustrées par la figure 8. Le chauffage ultra-rapide augmente la proportion de gaz et d'aromatiques légers (B.T.X.) au détriment des hydrocarbures liquides.

Par contre, un chauffage moins rapide augmente le taux global de dévolatilisation, c'est-à-dire le but poursuivi, et permet de produire jusqu'à 30 % d'hydrocarbures liquides. Suivant l'objectif visé, on peut donc en changeant les conditions expérimentales, obtenir en quantités prépondérantes, soit du gaz méthane, soit des hydrocarbures liquides. Le taux de dévolatilisation pour les charbons à haute teneur en matières volatiles dépasse 50 %.

L'hydrogénopyrolyse est beaucoup étudiée ces dernières années car elle permet de produire des quantités importantes d'hydrocarbures en des temps de réaction très courts. Le problème fondamental est l'utilisation du coke résiduel. La plupart des travaux se placent dans l'optique de gazéifier directement de cette manière autant que possible de la masse de charbon et d'utiliser le coke résiduel à la production d'hydrogène. Cette optique est valable pour les pays à charbon bon marché qui veulent en effectuer la gazéification intégrale. Pour les pays comme l'Europe, qui n'ont pas cette chance, et qui importent la majeure partie du charbon qu'ils brûlent dans leurs centrales électriques, l'hydrogénopyrolyse offre la possibilité de développer une production importante d'hydrocarbures à condition d'être couplée avec la production d'électricité. Au lieu de brûler du charbon, qui fournit la calorie la plus économique, à l'heure actuelle, il faut lui faire subir un prétraitement, «l'écramer» par hydrogénopyrolyse et brûler le coke pulvérulent résiduel. Nous avons proposé l'an dernier cette solution. Elle est représentée dans le schéma de la figure 9. Elle permettrait de produire plusieurs millions de tonnes d'hydrocarbures par an. Par tranche de 1000 MWe de production d'électricité au départ du coke résiduel, il y aurait une production de 0,52 M t/an d'hydrocarbures liquides pour 20 % de rendement en liquides seulement de l'hydrogénopyrolyse. Une généralisation progressive au cours des 10 prochaines années du prétraitement par hydrogénopyrolyse du charbon destiné à être brûlé

COMPARISON OF PYROLYSIS WITH HYDROGENATION



EFFECT OF HEATING RATE

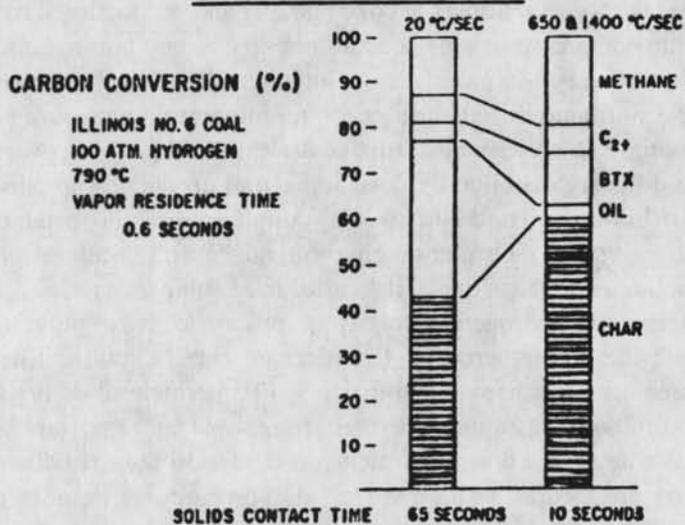


FIG. 8. - Rendements d'hydrogenopyrolyse par chauffage rapide.

dans les centrales électriques, permettrait le développement d'une carbochimie importante et fournirait des millions de tonnes d'hydrocarbures liquides et de gaz méthane, d'origine non pétrolière.

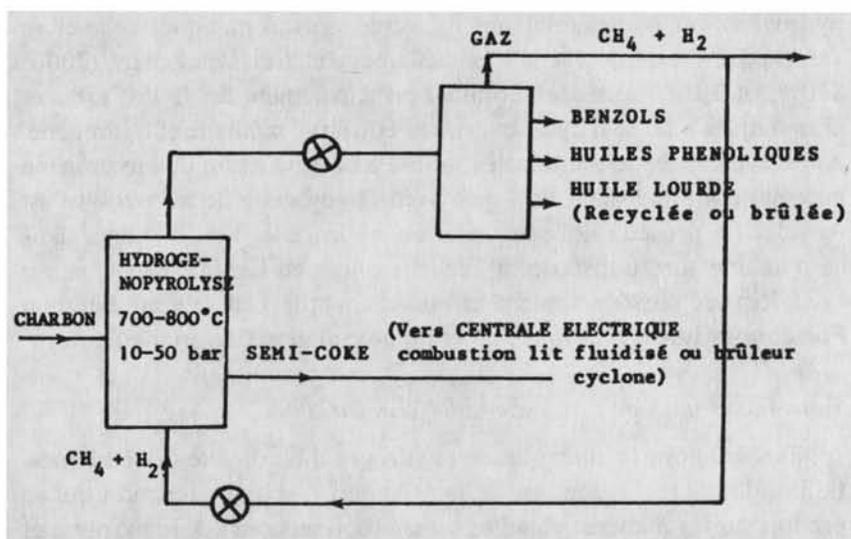


FIG. 9. - Prétraitement par hydrogenopyrolyse des charbons brûlés en centrales électriques.

Il y a actuellement dans le monde cinq ou six procédés d'hydrogenopyrolyse en développement. Un seul est déjà industriellement en exploitation : le procédé Lurgi Rhurgas. Une usine fonctionne à Porsten (R.F.A.). Elle a une capacité de traitement de 1.764 t/jour. Le procédé COALCON (U.S.A.) est expérimenté à l'échelle de 20 t/jour. Une unité industrielle de démonstration de 2.600 t/j est en cours d'étude.

4.2. Obtention d'hydrocarbures aromatiques légers à partir des composés polyaromatiques du charbon

Notre laboratoire a élaboré un procédé de production simultanée d'hydrocarbures aromatiques légers (B.T.X.) et d'éthylène à partir des composés polyaromatiques du charbon.

La pyrolyse et la liquéfaction du charbon ne détruit pas la structure polyaromatique du charbon. Elle provoque la rupture à l'endroit des

ponts entre les ensembles polycycliques. Ces composés polyaromatiques ont peu d'intérêt pour la grande chimie industrielle organique, à l'échelle des millions de tonnes par an. Il en est tout autrement du benzène et de l'éthylène. Nous avons montré que si on procède à une hydrogénation complète d'une molécule polyaromatique, celle-ci se décompose thermiquement très facilement et très rapidement (700 à 800 °C et 0,1 à 1 seconde), donnant principalement des hydrocarbures aromatiques à un seul cycle et des gaz éthylène, méthane et hydrogène. Après séparation, le méthane est utilisé à la production de l'hydrogène nécessaire à l'hydrogénation qui, avec l'hydrogène de la pyrolyse est recyclé. Le procédé est autonome en hydrogène. Nos résultats dans ce domaine sont transposés à l'échelle pilote en Grande Bretagne, au Coal Research Establishment et en Allemagne Fédérale au Bergbau Forschungs Institut, et font l'objet d'une collaboration triangulaire.

4.3. *Mécanismes de l'hydrogénation des carbones*

Nous étudions la cinétique de l'hydrogénation directe des carbones. Le but de ces recherches est de faire la part de l'hydrogénation qui se produit sur les matières volatiles du charbon au cours de la pyrolyse et celle du coke résiduel. Différents facteurs influencent la réactivité des carbones. Certains carbones sont pratiquement inertes à l'hydrogène. On étudie l'influence de catalyseurs minéraux, l'influence de la structure macérale des lignites sur leur réactivité, etc. L'ensemble des facteurs qui influencent la structure et la texture des cokes produits au cours de l'étape préalable de la pyrolyse, apparaissent comme ayant une influence sur leur hydrogénation.

5. CONCLUSIONS

Un effort immense est réalisé dans le monde entier pour valoriser le charbon comme combustible primaire et comme source de carburants liquides et de produits chimiques. Les travaux effectués dans notre laboratoire depuis 1960, nous ont permis d'intégrer nos recherches dans le programme de recherche européen de la CECA financé par la Commission des Communautés européennes. Ce programme tend à éviter une duplication des recherches dans les pays de la Communauté. Il est suivi et contrôlé par les commissions scientifiques que la direction charbon de la CCE a mis en place depuis longtemps. Grâce à ces réunions semestrielles dans les domaines «Valorisation chimique et

physique du charbon», «Techniques de cokeries», «Procédés de valorisation», une grande unité d'action et une concertation continue se sont établies entre les partenaires européens de cette recherche. Notre laboratoire est chargé de traiter les thèmes que j'ai indiqués. Il le fait avec d'autant plus d'enthousiasme que le résultat de nos recherches est largement diffusé et mis en œuvre par nos partenaires, grâce à des accords de collaborations qui ont pu être conclus sous l'égide de la C.C.E. Celle-ci nous a permis de disposer de moyens puissants et je tiens à lui en exprimer ici toute ma gratitude.

l'énergie de la biomasse

INTRODUCTION

En ce qui concerne l'utilisation énergétique de la biomasse, l'évolution qui était en cours – charbon de bois, gazéification du bois – s'est heurtée à la production croissante de combustibles fossiles, à l'époque moins coûteux et d'emploi plus commode.

L'attention que l'on porte à nouveau aux biomasses comme sources d'énergie doit être tempérée par le fait qu'elles ne peuvent contribuer que très partiellement à résoudre le problème de la réduction de nos importations en combustibles fossiles.

Il ressort des inventaires nationaux [1] que la biomasse immédiatement disponible en Belgique pourrait fournir, à des prix concurrentiels, de l'ordre de 640 000 tep, soit 1.3% de la consommation annuelle apparente de notre pays pour 1980 (50 M tep) (*).

Cependant, il s'agit d'une ressource renouvelable et sa contribution, aussi modeste soit-elle, doit absolument être prise en considération.

De plus, lorsqu'il s'agit de déchets, son exploitation permet de résoudre bon nombre de problèmes de pollution et contribue dès lors à la protection de l'environnement.

Les techniques de conversion des biomasses permettent en outre la décentralisation de la production, ce qui peut conférer à des utilisateurs individuels ou à des petites industries une autonomie partielle, voire totale dans certains cas particuliers.

La Belgique compte un certain nombre de réalisations concrètes dans des domaines tels que : la sélection d'espèces forestières à vocation énergétique, la production de combustibles par densification de biomasse, la production de gazogènes polyvalents et performants, la valorisation de résidus agricoles et industriels par digestion anaérobie, etc.

Dans le contexte économique actuel, il importe de continuer les efforts de recherche et développement et de promouvoir les unités de démonstration, ainsi que l'industrialisation des procédés mis au point.

(*) 1 tep = 1 tonne équivalent pétrole (prise égale à 42 GJ).

LA BIOMASSE

Un individu (organisme), végétal ou animal, possède à un moment donné une biomasse déterminée, que l'on exprime en poids frais (vf) ou en poids de matière sèche (MS). Cette biomasse est en fait un ensemble organisé de molécules organiques (matériaux biologiques) telles que des protéines, des glucides, des lipides, des acides nucléiques, etc.

Cette biomasse est, en dernière analyse, le fruit de l'activité des organismes dits producteurs (autotrophes) qui, par photosynthèse, transforment l'énergie solaire (photique) en énergie chimique potentielle (molécules organiques). Les matières premières minérales (dioxyde de carbone, eau, nitrates, etc.) sont fournies par le monde extérieur abiotique.

Ces producteurs sont le point de départ de chaînes trophiques, séquences coordonnées d'organismes dits consommateurs (l'homme en fait partie), qui élaborent leurs propres molécules à partir des matières organiques complexes déjà synthétisées par d'autres.

Du côté des producteurs, si l'efficacité photosynthétique maximale théorique (au niveau de la chlorophylle et par rapport au RPA – Rayonnement Photosynthétiquement Actif) est de l'ordre de 25 %, il n'en est pas du tout de même lorsqu'on évalue l'efficacité de la conversion photosynthétique (rapport du contenu énergétique de la biomasse produite à celui de l'énergie solaire reçue) au niveau de la plante ou de la phytocénose.

Les meilleurs taux de conversion (jacinthe d'eau sous serre, en juin et juillet par exemple) sont de l'ordre de 4 ou 5 % [2]. En se rapportant au rayonnement solaire global reçu pendant l'année entière, ce qui correspond à la tendance de l'écologiste et de l'économiste, l'efficacité photosynthétique des systèmes agricoles ou forestiers dépasse rarement 1 % ; quant à l'efficacité moyenne à l'échelle du globe pour l'ensemble des producteurs autotrophes, elle est de 0.1 à 0.2 % [4].

Ces fortes différences entre les efficacités réalisées et l'efficacité maximale théorique résultent de bon nombre de facteurs éco-climatologiques, physiologiques et autres, sur lesquels l'homme peut très difficilement agir. Il s'ensuit que les efficacités réalisées atteindront au mieux quelques pour-cent.

La marge de progrès possible correspond néanmoins à multiplier les efficacités actuelles par un facteur 4 ou 6. Les « promoteurs de la

verdure» ont donc tout lieu de se réjouir, car déjà la végétation du globe fixe annuellement une quantité d'énergie bien plus grande (7 à 10 fois) que la consommation énergétique mondiale actuelle. En outre, le rendement photosynthétique, si infime soit-il, ne correspond pas seulement à de l'énergie captée mais à de l'énergie stockée.

En ce qui concerne les consommateurs (herbivores puis carnivores), on peut dire que la masse des organismes formant un niveau trophique représente l'énergie accumulée à ce niveau sous forme chimique. Le passage de la matière organique au travers des divers niveaux de consommation se fait avec des pertes considérables : fraction importante brûlée par la respiration, déchets non assimilés, etc. Il s'ensuit que seule une partie de l'énergie potentielle du niveau précédent est récupérée par le suivant.

Dans l'optique d'une rationalisation de son exploitation, la biomasse présente des inconvénients liés à son exigence en terrains, au caractère saisonnier de sa production et à son important volume à l'état frais. Par contre, il faut inscrire à son actif son caractère renouvelable et la diversité des produits de consommation qu'elle peut fournir. En effet, elle constitue la seule source de carbone renouvelable, que ce soit pour l'alimentation, l'industrie (chimie, bois d'œuvre, etc.) ou pour l'énergie.

La biomasse exploitable à des fins énergétiques n'est pas seulement constituée de forêts et autres formations végétales en place, mais comprend aussi les nombreux sous-produits (rebut, résidus, déchets) de l'exploitation qui est faite par ailleurs des biomasses, principalement dans les secteurs agro-alimentaire et sylvicole.

A côté des formations végétales naturelles et des cultures spécifiques, on trouve donc comme sources de biomasse à finalité énergétique les taillis et autres rebuts ligneux, les déchets de l'industrie du bois (sciures, copeaux, dosses, ...), les résidus de récolte (rafles de maïs, paille, ...), les lisiers (déjections de bovins ou de porcins), les ordures ménagères, les boues de station d'épuration, etc.

La biomasse immédiatement disponible dans notre pays est d'ailleurs principalement constituée par des déchets, matières qui jusqu'à présent étaient abandonnées ou détruites. A moyen terme, il est possible d'augmenter la quantité de biomasse disponible, par exemple par la culture d'essences énergétiques à croissance rapide.

LES CULTURES ÉNERGÉTIQUES

Comparées aux sous-produits de l'agriculture, de la forêt ou de l'industrie, les cultures énergétiques ont l'avantage d'une production plus élevée par unité de surface. En contrepartie, elles nécessitent la mise en œuvre de facteurs de production (engrais, eau, travaux culturaux, ...) et leur implantation peut entraîner une compétition pour l'espace avec la production d'aliments humains.

A priori, cette solution est donc difficilement envisageable dans les pays qui ne disposent pas de vastes territoires à faible densité de population, peu cultivés ou mal rentabilisés. C'est pourquoi seuls des pays comme les U.S.A., le Brésil, le Canada et dans une moindre mesure la France et la Suède, peuvent dès aujourd'hui s'orienter vers les cultures énergétiques.

Le Brésil est d'ailleurs fortement engagé dans cette voie avec un objectif de production pour 1985 de 110 millions d'hectolitres d'éthanol à partir de plantations spécifiques de canne à sucre [2].

De nombreuses recherches sont menées dans le domaine, elles concernent la biomasse lignocellulosique forestière (peuplier, aulne, eucalyptus, ...) ou agricole (canne de provence, ...), les plantes alcooligènes (betterave, canne à sucre, topinambour, ...), les plantes à hydrocarbures (hévéea, guayule, euphorbes, ...) et la biomasse aquatique (algues, jacinthe d'eau, ...). Cette dernière présente l'énorme avantage de pouvoir coloniser des milieux où la compétition pour l'espace est réduite ; de plus, les végétaux aquatiques, non soumis au stress hydrique, ont un potentiel de production supérieur à celui des plantes terrestres.

Certaines espèces aquatiques peuvent également être utilisées à des fins de dépollution. La jacinthe d'eau dont l'utilisation est envisagée par la voie de la méthanisation, peut par exemple être cultivée en bassins d'eau résiduaire chaude.

Qu'en est-il des cultures énergétiques dans un petit pays fortement peuplé comme la Belgique ?

La réponse est très simple, il n'existe à l'heure actuelle aucune culture énergétique en Belgique. Néanmoins, l'examen de la situation nationale a permis de dégager certaines filières offrant quelques potentialités [1].

Du côté de l'aquaculture, les perspectives sont relativement limitées, car les emplacements de production doivent se trouver là où la chaleur

et la nourriture sont aisément disponibles et à bas prix. Dans les conditions nationales, ces cultures ne sont envisageables qu'en bassins artificiels alimentés par des eaux résiduaires, urbaines ou agro-industrielles, chaudes ou réchauffées (par le rejet thermique d'une centrale électrogène par exemple). Des installations de ce type ont d'ailleurs fait l'objet de plusieurs études et certaines d'entre elles ont été développées au stade semi-industriel. Cependant, cette technique d'aquaculture est, jusqu'à présent, plutôt dirigée vers le recyclage des déchets biodégradables en protéines nouvelles pouvant entrer dans différentes chaînes alimentaires. La filière énergétique, bien que concevable, n'a pas connu de développement à ce jour.

En ce qui concerne la sylviculture, les sites propices sont beaucoup plus répandus. En effet, il existe dans notre pays de nombreuses surfaces forestières peu ou mal exploitées, dont la rénovation pourrait être dirigée vers la production d'énergie, sans que cela ne porte préjudice à la production de bois d'œuvre.

La solution la plus rentable consiste à mettre en place une sylviculture à rotation rapide (5-10 ans) en utilisant des espèces sélectionnées pour leur haute productivité. Sur base d'une production annuelle réaliste de 15 tonnes de matières sèches par ha, l'exploitation de 30 000 ha, soit 5% de la surface boisée belge, fournirait de la sorte environ 160 000 tep. [1].

Une troisième et dernière solution serait d'intégrer la production d'énergie et d'aliments humains.

Il s'agit de créer des systèmes de production de biomasses dont on peut tirer un mélange de produits et qui font intervenir plusieurs transformations successives, les sous-produits d'une étape étant valorisés dans la suivante. Ainsi par exemple : la fermentation alcoolique fournit un résidu protéique qui peut être valablement utilisé en alimentation du bétail, ce dernier fournit quant à lui un lisier valorisable par biométhanisation, le sous-produit de cette dernière transformation pouvant lui-même servir au maintien de la fertilité des sols de culture.

Ce n'est qu'au prix d'une telle intégration que les cultures énergétiques, établies sur des terres traditionnellement réservées aux cultures alimentaires ou à l'élevage, peuvent devenir économiquement rentables.

Il va sans dire que l'établissement de tels complexes agro-énergétiques nécessite une telle restructuration de notre système agricole

qu'il est impossible d'en donner une étude technico-économique détaillée, cela nécessiterait trop d'hypothèses et de spéculations pour obtenir finalement un résultat hasardeux.

Notons au passage que 80% de la production agricole belge est uniquement destinée à l'alimentation du bétail, alors que la préférence de notre population pour les aliments carnés est discutable tant du point de vue de la valeur alimentaire que du point de vue énergétique : les animaux herbivores sont de très mauvais transformateurs des calories fournies à l'ha par les producteurs végétaux. L'homme réaliserait donc une importante économie d'énergie en mangeant moins de produits carnés et plus de produits végétaux.

Ce n'est qu'en commençant par réviser notre mode d'alimentation que l'établissement de systèmes de production de biomasse, qui seraient adaptés de concert à la fourniture d'aliments humains et d'énergie, pourrait trouver toute sa signification. Il ne s'agit pas de renoncer définitivement à notre beefsteak ou à notre côte de porc, mais de repenser nos filières alimentaires, de manière à les rendre moins déficitaires en énergie.

LES FILIÈRES DE TRANSFORMATIONS

D'où qu'elle provienne, la biomasse doit être transformée en vecteurs d'énergie – solides, liquides ou gaz – qui conduisent aux énergies finales : thermique (chaleur), mécanique (force motrice) ou électrique (électricité).

Les technologies de transformation empruntent deux voies différentes selon le degré d'humidité de la matière : l'une thermochimique adaptée aux matériaux secs, ou facilement séchables (teneur en eau inférieure à 50%), l'autre biochimique convenant pour les produits plus humides. Avant d'aborder les techniques de conversion, passons rapidement quelques-uns des vecteurs d'énergie en revue.

Les vecteurs d'énergie

Les combustibles solides

L'utilisation la plus directe et aussi la plus ancienne de la biomasse comme source d'énergie se présente bien entendu sous la forme de *bois de feu*. Notons au passage que la combustion pure et simple du bois ne permet que le chauffage et ce avec un mauvais rendement (0,2 à 0,4

selon les auteurs). Cette utilisation est encore courante dans les pays en développement.

Selon la littérature, la consommation de bois dans les pays du tiers monde serait d'au moins 1 tonne de bois par personne et par an. Les conséquences «écologiques» de la surexploitation destructive des forêts naturelles sont nombreuses (perturbation des cycles biogéochimiques, dégradation des sols, désertification par érosion, ...) et partiellement imprévisibles (effets climatiques engendrés par une augmentation de la teneur en CO₂ de l'atmosphère par exemple)[4]. Il est donc urgent d'apporter à ces pays à démographie galopante, des moyens d'actions dans la gestion de leur potentiel d'énergie verte. On peut songer : au développement de plantations d'essences à croissance rapide (rotation de 4-5 ans) et de valeur calorifique élevée (faible teneur en eau), à l'introduction de techniques telles que la densification ou la gazéification, qui, nous le verrons, permettent une meilleure valorisation du bois et de ses sous-produits d'exploitation. Encore faut-il que ces techniques, mises au point et testées dans nos pays, soient adaptées aux exigences «de terrain» des pays non industrialisés, ce qui suppose une certaine rusticité.

L'obtention de *charbon de bois* (carbonisation) remonte à l'ère des cités lacustres. Le principal avantage du procédé est de fournir un combustible solide relativement dense et plus commode d'emploi que la matière première dont il est issu. Cette technique, qui s'est perpétuée à travers les âges, a bien sûr évolué, notamment vers la récupération des autres sous-produits (voir pyrolyse et gazéification). En 1936, on aurait carbonisé dans le monde entier 4.5 à 5 millions de stères (1 stère = 1 m³) de feuillus à l'échelle industrielle [3].

On estime généralement qu'un peu plus de 40 pour-cent de l'énergie contenue dans le bois se retrouve dans le charbon de bois, dont le pouvoir calorifique est de l'ordre de 32 000 kJ/kg.

L'obtention de biocombustibles solides est aujourd'hui possible par *densification*. Cette technique s'applique à des déchets ou rebuts ligneux d'origines diverses : pailles, sciures et copeaux de bois, coques d'arachides, bagasse, etc. Compte tenu de leur faible masse spécifique et de leur hétérogénéité de forme, ces résidus sont très souvent mal utilisés ou complètement abandonnés.

La technique de densification de biomasse consiste à les conditionner sous forme de briquettes très compactes, aisément manipulables, pouvant se substituer au bois ou au charbon de bois. Diverses technolo-

gies existent, cela va de la presse manuelle jusqu'à l'unité de densification à haute pression, mobile et autonome.

Notons qu'une unité de densification peut éventuellement comporter des équipements pour le prétraitement de la biomasse : broyeur, séchoir, etc.

Dans le cas des densificatrices haute pression, on obtient, par extrudage, des bûchettes d'une densité spécifique de l'ordre de 1.25 kg/dm³, d'un pouvoir calorifique variant entre 18 800 et 20 300 kJ/kg et d'une humidité résiduelle de 3.5 à 5%.

Compte tenu de ces caractéristiques et de la possibilité de sortir en continu un produit calibré, cette technique s'adapte facilement à l'automatisation de l'alimentation des fours industriels.

Pour les unités autonomes, le(s) moteur(s) et le groupe électrogène sont alimentés en gaz pauvre par un gazogène, lui-même alimenté en matières ligneuses densifiées ; la part d'énergie consommée pour la densification elle-même varie, suivant le type d'installation, entre 8 et 20% de l'énergie produite sous forme de briquettes.

Les combustibles liquides

Le méthanol peut provenir de la transformation catalytique des gaz de pyrolyse ou de méthanisation. Cette transformation est très bien connue et s'applique au gaz naturel et au charbon gazéifié avec des rendements respectifs de 90 et 65%. Par cette transformation, le méthanol pourrait d'ailleurs concurrencer le gaz naturel liquéfié pour les transports sur longue distance.

Les possibilités d'application du méthanol sont relativement nombreuses : moteurs à combustion interne, chaudières, turbines.

Les moteurs à combustion interne actuels peuvent aisément être adaptés à l'utilisation de mélanges essence-méthanol contenant jusqu'à 15% de méthanol.

Son indice d'octane, supérieur à celui du supercarburant actuel, permet de diminuer la quantité d'additif au plomb. Par contre, le méthanol nécessite des réservoirs plus volumineux pour atteindre une même autonomie et sa toxicité suppose de le manipuler avec une extrême prudence.

Il faut encore signaler : les problèmes de démarrage à froid, les risques de séparation de phase en présence de traces de vapeur d'eau et les problèmes de pollution liés à la production d'acétaldéhyde en cas de combustion incomplète.

L'éthanol s'obtient par fermentation de la biomasse suivie d'une distillation. Il peut être utilisé dans des moteurs ou comme produit de base pour la pétrochimie. En mélange avec l'essence et jusqu'à 20 % d'éthanol, les moteurs actuels ne nécessitent qu'une légère adaptation. Son caractère antidétonant permet d'éviter les additifs au plomb. Il est non toxique et les produits de sa combustion sont peu ou non polluants. Il n'y a pas lieu d'augmenter la capacité des réservoirs et le démarrage à froid ne pose pas de problèmes importants. L'éthanol est donc un carburant plus adéquat que le méthanol.

Dans l'industrie pétrochimique, l'éthanol est transformé en éthylène, qui constitue un produit de base idéal à l'heure actuelle. Pour une utilisation en pétrochimie, notons qu'il est possible d'obtenir l'éthylène sans passer par la phase de distillation, il suffit pour cela de faire passer le mélange eau-alcool à haute température sur un catalyseur.

Les combustibles gazeux

La méthanisation de la biomasse permet d'obtenir du *méthane* (CH_4), substitut parfait du gaz naturel. Son pouvoir calorifique est de 37 600 kJ/m³. Il peut être utilisé pour la production de chaleur à partir d'un brûleur et la production de force motrice par l'emploi de moteurs à gaz.

Les gaz de pyrolyse-gazéification ont une composition variable suivant les conditions opératoires. *Le gaz pauvre* de faible pouvoir calorifique (4 000 à 6 000 kJ/m³ selon les auteurs), n'a qu'un domaine d'application limité. Il peut être utilisé dans des moteurs à gaz ou dans des brûleurs adéquats pour la production de chaleur, mais il est impropre à une utilisation en synthèse en raison de sa forte teneur en azote. *Le gaz de synthèse* a un pouvoir calorifique de l'ordre de 11 300 kJ/m³, il est composé essentiellement d'oxyde de carbone (CO), d'hydrogène (H_2) et de méthane (CH_4). Il peut servir de matière première en pétrochimie, pour la production d'ammoniac, de méthanol et d'autres produits. Il constitue également un excellent carburant pour chaudières ou autres applications.

Production d'énergie totale

Il faut préciser que dans le cadre d'un exposé aussi général, nous ne pouvons que très partiellement rendre compte des possibilités de transformations du biocombustible en énergie utile et de la probléma-

tique que pose l'adéquation des générateurs d'énergie utile aux biocombustibles d'une part, et aux besoins des utilisateurs d'autre part.

Nous voudrions néanmoins souligner l'intérêt des systèmes de production à Energie Totale. Il s'agit de la production combinée d'électricité et de chaleur, cette dernière étant prélevée sur les circuits de refroidissement et les gaz d'échappement du groupe électrogène (moteur accouplé à un alternateur). La récupération des chaleurs ordinairement dissipées aux alentours immédiats des moteurs est pratiquée çà et là depuis longtemps. Cette pratique tend aujourd'hui à se généraliser, car elle augmente le rendement énergétique global et donc la rentabilité des installations.

La cogénération à petite échelle, qui est du domaine de la valorisation énergétique des biomasses, permet des rendements très élevés car elle évite les pertes par transport, l'électricité et la chaleur étant générés au point d'utilisation terminale. Le système TOTEM mis au point par FIAT a un rendement global de l'ordre de 90 % (2/3 chaleur, 1/3 électricité).

Les procédés thermochimiques

Incinération

Spécifions tout d'abord que l'incinération pure et simple ne permet que le chauffage et ce avec un mauvais rendement énergétique. De nos jours, cette technique ne peut plus être envisagée qu'à condition de récupérer l'énergie calorifique sous forme de vapeur ou d'électricité. Les fours spécialisés dans la récupération de chaleur nécessitent bien entendu un plus gros investissement mais exigent aussi un meilleur conditionnement du combustible que les incinérateurs classiques. La capacité minimale requise pour rentabiliser de telles installations dépasse bien souvent, en tous cas en Belgique, les disponibilités en biocombustibles des utilisateurs potentiels (scieries, fermes, ...); pour garantir la régularité de la fourniture de vapeur, il est dans ce cas nécessaire de disposer de brûleurs d'appoint pour combustibles conventionnels. D'autre part, le procédé a le désavantage de produire une énergie non stockable et peu souple.

Un cas d'espèce est constitué par l'incinération des déchets domestiques. Il s'agit moins de déterminer si le procédé est rentable ou non, que de solutionner à court terme le problème souvent crucial de

l'élimination des immondices, dans un secteur géographique et un environnement socio-économique déterminés.

Une installation d'incinération de déchets ménagers avec récupération de chaleur nécessite une capacité minimale de l'ordre de 40 000 tonnes par an, ce qui correspond à 120 000 habitants pour la Belgique [1]. Ce seuil de rentabilité par nombre d'habitants peut cependant être abaissé en incinérant conjointement des boues de station d'épuration.

Lorsqu'on alimente par des matières aussi hétérogènes que des déchets ménagers, aux inconvénients précédemment cités, il faut ajouter les problèmes liés à l'encrassement des foyers et surtout, à la sortie de l'incinérateur, les risques non négligeables de pollution. Du point de vue du recyclage, cette méthode présente bien entendu le grave inconvénient de détruire bon nombre de matériaux réutilisables (plastiques, papier, ...), c'est pourquoi elle ne doit être considérée que comme un pis-aller transitoire.

Pour être complet concernant l'incinération des biomasses, il faut encore mentionner les chaudières mixtes à l'usage des particuliers, qui peuvent être une alternative intéressante pour celui qui dispose de place pour le stockage et d'une source d'approvisionnement à bon marché.

L'attrait que peut susciter ces types d'installations doit néanmoins être tempéré par l'obligation de respecter certaines normes de sécurité et de pollution. Il en est de même pour le chauffage d'appoint que constituent les poêles à bois et feux ouverts à récupération de chaleur.

Pyrolyse et gazéification

En fait, les termes de «carbonisation», «pyrolyse» ou «gazéification» s'appliquent à des procédés thermo-chimiques voisins. Le terme de carbonisation est généralement réservé à la production de charbon de bois sans récolte des sous-produits, ce dont nous avons déjà parlé.

La pyrolyse (distillation en vase clos) est une carbonisation d'un niveau technologique élevé, où la valorisation des différentes fractions est envisagée. Il s'agit d'une décomposition physico-chimique du bois, qui s'opère à la chaleur (jusqu'à des températures de plus ou moins 700 °C) en l'absence d'oxygène ou de gaz réactif. On obtient, suivant le traitement thermique choisi, une proportion variable de charbon de bois, de goudrons, de jus pyrolygneux et de gaz mixte (CO₂, CO, H₂, CH₄).

Comme matières premières, on utilise principalement le bois, les ordures ménagères et divers résidus agricoles secs.

Les produits pyrolygneux liquides trouvent un débouché dans l'industrie pétrochimique, notamment pour la production de méthanol, d'acide acétique et de leurs dérivés. La transformation en produits commercialisables, seule garante d'une valorisation du procédé de pyrolyse, exige, il faut le préciser, un appareillage coûteux et compliqué et consomme aussi beaucoup d'énergie [3]. Mais l'optimisation de la pyrolyse est loin d'être terminée, de sorte qu'à ce jour, il n'est pas possible de connaître le coût opérationnel des installations, ni la qualité, donc la valeur marchande, des produits récupérés.

A côté des systèmes traditionnels dans leur principe, des voies nouvelles sont testées. On étudie entre autres la possibilité de produire un combustible liquide à partir des jus pyrolygneux et du charbon de bois [2].

La gazéification peut être considérée comme une pyrolyse prolongée par une oxydation du charbon de bois et un cracking des gaz et pyrolygneux. En plus de l'apport thermique, la gazéification nécessite l'injection d'un gaz réactif au système. La solution la plus simple et aussi la plus économique utilise de l'air. Elle présente de ce fait l'inconvénient de ne produire que du gaz pauvre. Pour une utilisation en synthèse, il est nécessaire de procéder à une gazéification à l'oxygène.

Aujourd'hui, on tente d'améliorer le rendement des appareils, leur facilité de conduite et leur adaptation aux différents types de biomasses à traiter. La mise au point de systèmes de gazéification par catalyse pourrait venir concurrencer les procédés coûteux de gazéification à l'oxygène.

Un certain nombre d'unités de gazéification existent dans le monde. Les installations proposées sont des plus variées, elles se distinguent entre autres par la géométrie du four et les systèmes de filtres. Le rendement de la gazéification proprement dite varie entre 60 et 75 % suivant les conceptions.

Les principales limitations ne résultent pas du procédé de transformation, il s'agit plutôt de contraintes extérieures telles que la disponibilité en combustible, l'infrastructure électrique existante, etc. Dans nos conditions nationales, la production de chaleur est certes plus justifiée que la production d'électricité. Par contre, l'utilisation d'électrogazogènes de petite capacité peut se révéler extrêmement intéressante dans les pays où l'infrastructure électrique est beaucoup moins déve-

loppée. Pour la production d'électricité, les installations sont généralement équipées de moteurs du type Dual fuel-gaz pauvre (10/90).

Sur base d'estimations théoriques et de quelques expériences ponctuelles, notamment en France, il apparaît que de grosses unités de gazéification seraient à même de produire de l'énergie à des prix très compétitifs, là où l'on est assuré de pouvoir s'approvisionner à bon compte et régulièrement en bois ou en déchets lignocellulosiques de toute espèce [3].

Spécifions, si besoin en est, que les combustibles convenant à la gazéification sont préférentiellement le bois (à moins de 15 % d'humidité), le charbon de bois et les déchets agricoles ou forestiers densifiés.

Les procédés biochimiques

Les technologies dites «biochimiques» font intervenir des microorganismes, parmi lesquels les bactéries jouent un rôle prépondérant. Cette biodégradation de matières organiques s'opère par une suite de réactions biochimiques catalysées par des enzymes. Ces enzymes sont des molécules très spécifiques dont l'action ne peut s'exercer qu'en des points particuliers du substrat à dégrader. L'accessibilité à ces sites réactionnels joue un rôle déterminant sur la vitesse de dégradation. C'est ce qui explique que les biomasses sucrées ou amidonnées (mélasses, betteraves, pommes de terre, ...) sont plus aptes à la biodégradation que les substrats celluloses et lignocellulosiques (paille, bois et ses sous-produits, fumier, etc.).

L'hydrolyse de la cellulose, c'est-à-dire sa dégradation en hydrate de carbone puis en sucres monomères, constitue d'ailleurs la pierre d'achoppement des procédés biochimiques. On admet en effet que les principaux facteurs limitant la vitesse d'hydrolyse enzymatique sont la structure cristalline et la présence de lignine. L'hydrolyse de l'amidon pose quant à elle beaucoup moins de problèmes.

Pour améliorer la biodégradabilité des substrats, on peut leur faire subir, avant la transformation microbienne, une phase d'hydrolyse industrielle, qui met en œuvre des procédés chimiques, thermo-chimiques ou enzymatiques.

Si l'hydrolyse de la cellulose par voie acide est connue depuis plus de 150 ans, l'hydrolyse enzymatique est par contre très récente. Calquée sur le modèle de la nature qu'elle veut intensifier, cette voie utilise des enzymes (cellulases) synthétisées par de nombreux microorganismes,

dont le plus connu est *Trichoderma viridae*. Ce procédé laisse espérer des performances très supérieures à la voie thermo-chimique, extrêmement coûteuse en énergie.

Les biotechnologies n'ont cependant pas pour finalité de dégrader la matière organique. L'intérêt est ailleurs : il s'agit de favoriser la croissance sur ce substrat de microorganismes qui, parallèlement à la constitution de leurs propres molécules structurales (flux d'incorporation), synthétisent un produit technologiquement utilisable (flux de production).

Dans l'optique énergétique, l'intérêt porte bien entendu sur les processus qui libèrent des molécules combustibles. Nous parlerons de deux procédés : le premier, la fermentation alcoolique, est appliqué depuis des siècles, principalement à la production d'alcool de bouche ; le second, la méthanisation, est également connu depuis longtemps, mais suscite actuellement beaucoup plus d'intérêt qu'auparavant parce qu'il allie la production d'énergie, le recyclage et la dépollution, qui sont des problèmes bien actuels.

La fermentation alcoolique (éthylque)

Cette fabrication d'éthanol se fait par l'intermédiaire de *levures* qui décomposent le glucose provenant des matières sucrées ou amylacées en deux molécules d'éthanol avec dégagement de dioxyde de carbone.

Dans la pratique, le phénomène est limité par des inhibitions dues au substrat et à l'éthanol. La concentration en éthanol de la solution obtenue par fermentation ne dépasse pas 8-10 % [2]. De grandes quantités d'eau sont donc à éliminer et la distillation provoque une douloureuse ponction dans le bilan énergétique de la conversion.

On compte beaucoup dans l'avenir sur les distillateurs solaires, la sélection de souches de microorganismes capables de supporter des concentrations élevées en éthanol (augmentation du titre de la solution à distiller) et l'extraction en temps réel (Prof. A. Piérard (U.L.B.), communication personnelle). Il est aussi possible qu'une meilleure adaptation des procédés de distillation de l'alcool de bouche à un alcool de qualité inférieure puisse représenter une économie d'énergie substantielle [1]. On pourrait même envisager un procédé différent de la distillation ; une zéolite naturelle, la *clinoptilolite*, semble très prometteuse : elle retiendrait l'eau et pas l'alcool [3].

Il faut ajouter que les eaux résiduaires de la distillation, ou vinasses, sont riches en protéines et minéraux et qu'elles peuvent être traitées par

digestion anaérobie. La production de méthane qui en résulte permet de réaliser une économie d'énergie de 30 à 40 % sur la production d'éthanol.

Les levures excédentaires (non utilisées pour le cycle de fermentation suivant) ont un excellent contenu protéinique, ce qui permet de les valoriser en alimentation animale. Pour être commercialisables, il faut cependant les sécher jusqu'à une teneur en matière sèche de plus ou moins 90 %.

Comme matières premières potentielles en Belgique, on trouve, suivant l'ordre de biodégradabilité décroissant : les betteraves sucrières, les mélasses, les fruits, les pommes de terre, les grains de céréales (orge, froment, seigle, etc.), la paille et les vieux papiers. L'éthanol produit peut servir de carburant ou comme matière première pour l'industrie chimique. Dans la situation belge, la seconde utilisation semble plus opportune, tout au moins à court terme [1].

A titre d'exemple, on estime que le nombre de litres d'alcool 100° que l'on peut obtenir à partir de 100 kg de matières premières mises en œuvre sont : 9.3 à 10 pour les betteraves sucrières, 28.5 à 31.5 pour les mélasses de betteraves, 11.5 à 12.8 pour les pommes de terre [1].

La méthanisation

Le processus se développe dans le milieu naturel, notamment dans les dépôts organiques gorgés d'eau (sédiments de lacs, etc.) et dans le tractus gastro-intestinal des ruminants. Si la découverte du processus est ancienne (mise en évidence du gaz des marais par Volta en 1776), son exploitation est par contre restée très longtemps l'affaire de quelques individus isolés. Le processus a commencé à être largement utilisé en Europe par stabiliser les boues résiduaires de stations d'épuration (réduction de la quantité de matières fermentescibles et des odeurs). La production de méthane, à laquelle on accordait peu d'importance lorsque les produits pétroliers étaient peu coûteux, voit son intérêt croître sensiblement avec leur renchérissement.

Le procédé est aussi appelé digestion méthanique. Il s'agit d'une dégradation des matières organiques en l'absence d'oxygène, qui résulte de l'activité d'une biocénose microbienne complexe et qui aboutit à la production d'un gaz (biogaz) riche en énergie (environ 65 % de méthane et 35 % d'anhydride carbonique).

S'il est vrai que l'on connaît peu de choses de l'écologie microbienne des réacteurs en fonctionnement réel, les récentes observations qui ont

pu être faites sur des cultures anaérobiques en milieu artificiel ont néanmoins permis d'élaborer un schéma de la méthanogénèse (cf. figure suivante), dans lequel on distingue à l'heure actuelle trois communautés microbiennes ou groupes métaboliques : les bactéries fermentatives, acétogènes et méthanogènes.

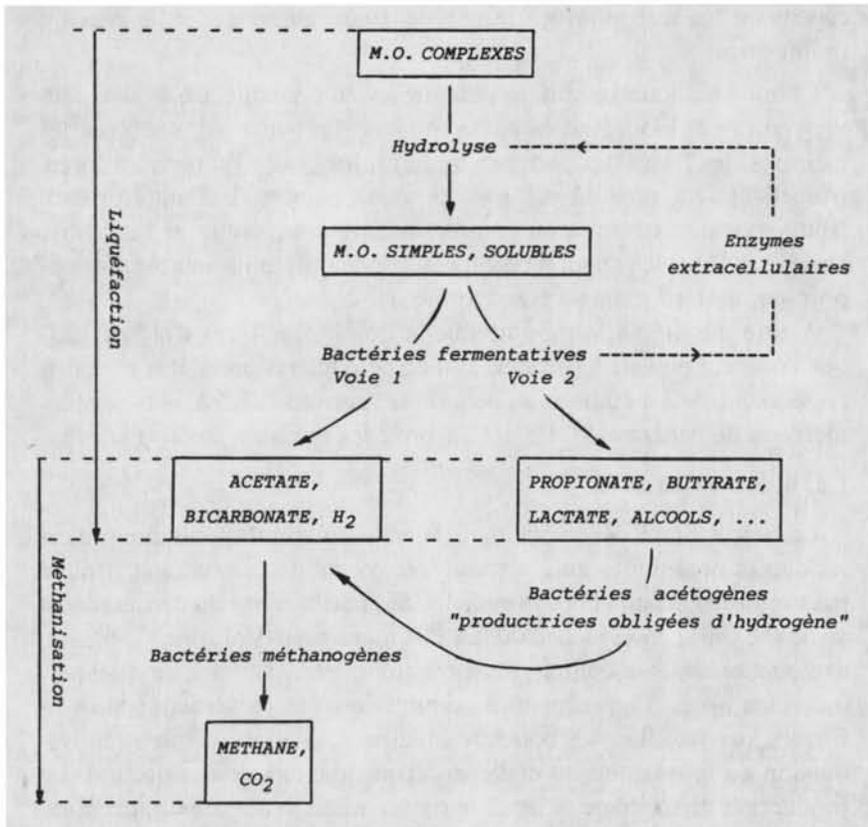


FIG. — Production de méthane par dégradation, en anaérobiose des matières organiques (M.O.).

D'après : BRYANT M. P. «Microbial Methane Production — Theoretical Aspects». J. Anim. Sci. (1979).

L'étape dite de liquéfaction (bactéries fermentatives) comprend l'hydrolyse des matières organiques complexes ; nous avons déjà mentionné que cette hydrolyse constitue la pierre d'achoppement des transfor-

mations biochimiques lorsque le substrat à traiter est riche en matériaux polymérisés (insolubles).

L'étape suivante, couramment appelée méthanisation, résulte en fait de l'activité de deux groupes de microorganismes, qui entretiennent des liens d'interdépendances assez étroits : les méthanogènes et les acétogènes. Ces deux groupes se caractérisent par des vitesses de croissance relativement lentes, c'est en l'occurrence ce qui limite le procédé dans le cas où on alimente avec un substrat facilement biodégradable (effluents de distillerie par exemple).

Dans la pratique, il s'agit de pouvoir convertir une importante quantité de matières organiques par unité de temps et ce, dans des cuves de tailles raisonnables, ne nécessitant pas des coûts d'investissement et des frais de fonctionnement (chauffage, entretien, etc.) prohibitifs. Il s'agit en fait de réaliser un compromis optimal entre la cinétique (m^3 de biogaz par m^3 de digesteur et par jour) et le rendement (m^3 de biogaz par kg de matières organiques) de la transformation, afin de diminuer le prix du gaz produit et de l'épuration concomitante.

Les bioréacteurs à méthane classiques se composent d'une cuve (réacteur) dans laquelle le substrat à traiter et la biocénose bactérienne sont périodiquement homogénéisés. Une fraction définie de cette masse en digestion est remplacée par du substrat frais à intervalles réguliers ; par définition, le temps de rétention – ou de séjour – est le nombre de jours nécessaires pour qu'un volume égal au volume total du digesteur ait ainsi été déplacé (*).

Ces digesteurs classiques dits «infiniment mélangés» ne s'appliquent valablement qu'à la méthanisation des substrats semi-liquides (moyennement biodégradables) tels que les lisiers, boues de stations d'épuration, résidus d'abattoirs, etc.

Pour le traitement des effluents liquides, riches en matières solubles aisément fermentescibles, ils présentent l'inconvénient de nécessiter des temps de rétention relativement longs du fait des faibles vitesses de croissance des bactéries méthanogènes.

Pour se libérer de cette contrainte, une nouvelle génération de réacteurs dits «à rétention de biomasse» commence à s'installer [7].

Plusieurs technologies sont proposées mais le principe de base est toujours le même : on introduit dans le réacteur un matériau support

(*) Pour un digesteur de 60 m^3 , appliquer un temps de rétention de 15 jours revient à renouveler $1/15^{\text{e}}$ de son volume, soit 4 m^3 , par jour.

adéquat (billes de verre ou de plastique, boues floculées, etc.) sur lequel les bactéries viennent se fixer.

Des résultats très intéressants ont été obtenus avec ce type de digesteur pour des substrats tels que les effluents de distillerie et les eaux résiduaires.

Dans le cas des résidus solides (fumiers, déchets domestiques), il n'existe pour le moment aucune technologie réellement efficace. Les études portent essentiellement sur l'amélioration des conditions d'hydrolyse. Dans cette optique, on envisage d'effectuer les opérations de liquéfaction et de méthanisation dans des réacteurs séparés. En outre, il serait éventuellement possible de «diriger» la liquéfaction vers la production d'un composé facilement méthanisable.

Il est reconnu que la digestion anaérobie stabilise très efficacement les effluents sans pour autant entraîner une production microbienne importante (faible taux d'incorporation). On admet généralement que 90% de l'énergie, contenue dans les matières qui ont été détruites, est retenue sous forme de CH_4 .

Sur base des productions observées à partir de la méthanisation d'un grand nombre de résidus agricoles et de lisiers, il est possible de dégager la valeur moyenne suivante : 1.3 m^3 de CH_4 est produit par kg de carbone transformé. En considérant que la teneur en carbone des substrats varie entre 30 et 40% du poids sec et que le taux de destruction moyen est de 60%, on obtient un rendement de production par rapport aux matières introduites dans le digesteur de l'ordre de 0.27 m^3 de CH_4 par kg.

L'application d'un Upflow Anaerobic Sludge Blanket (USAB) à l'épuration d'eaux résiduaires municipales conduit d'après LETTINGA [6] à une économie d'énergie de 1.4 MJ/kg DCO (*) par rapport au traitement aérobie ; à cela il faut ajouter une production de CH_4 équivalente à 9.1 MJ/kg DCO (pour une réduction de charge organique de 70%). Le procédé anaérobie génère en outre une moindre quantité de boues microbiennes, ce qui constitue un avantage appréciable (ceci vaut spécialement pour les réacteurs à rétention de biomasse).

Il arrive que l'on cite les boues de station d'épuration aérobie comme une source importante de matières organiques pouvant être traitées par une digestion anaérobie complémentaire ; il ne faut nullement

(*) DCO = Demande Chimique en Oxygène.

s'illusionner, car si toute la boue de toutes les installations existantes ou projetées en Belgique était traitée, cela fournirait de l'ordre de $1.3 \cdot 10^6$ GJ/an, soit environ 31 000 tep/an [1].

Le sous-produit de la fermentation méthanique, la boue «digérée», a fait l'objet de plusieurs études quant à sa destination. Il apparaît que dans la plupart des cas (traitement d'effluents agricoles ou agro-industriels), ces boues constituent un excellent amendement de sol, notamment en raison d'une bonne teneur en minéraux fertilisants et d'un rapport carbone/azote adéquat.

Il faut encore citer le couplage possible de la méthanisation et de la récupération des basses enthalpies. Celles-ci sont un peu partout récupérables (centrales électriques, sources géothermiques) et parfois, au sein même de l'entreprise qui exploite le digesteur (brasseries, conserveries, ...). Cela évite de consommer une partie du biogaz pour le maintien de la température du digesteur, le gain énergétique est loin d'être négligeable.

CONCLUSION

Avant tout, il y a lieu de remarquer que nous nous en sommes tenus aux filières pour lesquelles quelques réalisations concrètes existent et qui ont dès lors le plus de chances de se réaliser ; nous n'avons bien entendu nullement épuisé le sujet. La biomasse peut en effet produire de l'énergie sous d'autres formes et/ou par le biais d'autres transformations : hydroliquéfaction, bioproduction d'hydrogène, etc.

D'autre part, il y a des procédés qui économisent indirectement l'énergie en transformant la biomasse en produits industriels ou alimentaires substituables à d'autres, coûteux en énergie : fibres, alimentation pour bétail, compost, etc.

En guise de résumé, retraçons rapidement les grandes lignes de notre exposé.

Dans l'état actuel des choses, la gazéification et la méthanisation apparaissent comme prioritaires parmi les technologies à mettre en œuvre pour la production d'énergie à partir des biomasses.

La gazéification permet de valoriser les déchets solides, riches en matériaux ligno-cellulosiques, alors que la méthanisation convient aux déchets plus humides. Ces deux voies de transformation génèrent des combustibles gazeux facilement utilisables en chaudières ou dans les

moteurs à combustion interne. Nous avons souligné l'intérêt de la cogénération d'électricité et de chaleur.

Parmi les autres procédés thermo-chimiques : l'incinération avec récupération de chaleur peut s'avérer rentable dans certains cas particuliers ; la pyrolyse donne quant à elle des produits valorisables dans l'industrie pétrochimique mais l'optimisation du procédé reste à faire.

Du côté de la fermentation éthylique, nous avons vu que l'on attend beaucoup des recherches actuellement menées en vue de diminuer l'input énergétique nécessaire à la distillation ; dans la situation belge, l'éthanol produit serait préférentiellement utilisé dans l'industrie chimique.

Il apparaît assez clairement que l'énergie tirée de la biomasse ne pourra jamais contribuer de façon extrêmement significative à l'approvisionnement énergétique de pays, comme le nôtre, qui ne disposent pas de cette ressource en abondance. Dans le contexte actuel, il est cependant tout à fait indispensable de faire appel aux énergies non classiques (solaire, géothermie, biomasse, ...) là où c'est possible et rentable.

Si des mesures adéquates sont prises, il nous paraît évident que les énergies non conventionnelles, dont la biomasse, pourraient couvrir une part non négligeable des besoins en énergie de la petite industrie, de l'agriculture et des ménages. Une meilleure gestion de nos ressources naturelles, par la mise en œuvre d'un plan de récupération des déchets et par la rénovation de notre système forestier notamment, conduirait à augmenter la quantité de biomasses effectivement valorisables dans notre pays. Ajoutons à cela que d'importants progrès peuvent encore être réalisés au niveau des procédés de conversion, de manière à en augmenter le rendement énergétique.

Il s'ensuit que la contribution des biomasses pourrait à moyen terme atteindre 3 à 5 Mtep, soit 6 à 10 % de notre consommation énergétique actuelle.

Il y a lieu de faire remarquer que les technologies dont il est question utilisent des équipements qui peuvent parfaitement être fabriqués chez nous et pour lesquels ils existe un important marché extérieur, principalement dans les pays non industrialisés.

Les techniques telles que la densification de biomasse, la gazéification ou la méthanisation peuvent, en effet, très facilement être adaptées aux besoins des pays du Tiers Monde. Il serait également intéressant que les ensembles belges, qui réalisent à l'étranger des installations clé

sur porte, puissent intégrer ces nouvelles technologies dans leurs projets, sur base d'équipements belges.

Quand on songe à l'intérêt que peut présenter pour un pays la mise en œuvre de nouvelles technologies, il paraît donc important d'élargir le cadre de réflexion, pour juger les choses à leur juste valeur. Dans le cas de la transformation des biomasses en énergie, on a vu qu'à une contribution modeste, mais réelle, à notre approvisionnement en ressources énergétiques, il faut ajouter les incidences bénéfiques que les technologies mises en œuvre peuvent avoir sur la préservation de l'environnement (réduction de la pollution) et sur plusieurs secteurs de notre activité industrielle. Tout cela contribue en définitive à rééquilibrer notre balance des paiements.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] ANSELIN M. (RUG), NAVEAU H. (UCL) et JAUMOTTE Ch. (FUN), rapport final scientifique n° 14 F : Etude de faisabilité concernant les possibilités concrètes de production et d'utilisation des biomasses en Belgique, 1979 – Programme National R&D dans le domaine de l'Economie des Déchets et des Matières Premières Secondaires, Edit. Services du Premier Ministre, Programmation de la Politique Scientifique.
- [2] CHARTIER Ph. et MERIAUX S., L'Energie de la Biomasse, La Recherche n° 113, juillet-août 1980.
- [3] DE BRACKELEIRE Ch., Contribution à l'Estimation des Ressources de l'Energie de Biomasse, travail de fin d'études, directeur P. DUVIGNEAUD 1978-1979.
- [4] DUVIGNEAUD P., La Synthèse Ecologique, Doin (Paris), 2° Ed. remaniée 1980.
- [5] HOUBRECHTS A., Le Problème de l'Energie en Belgique, EPE, numéro spécial, Vol. XV – n° 3-4, 1980.
- [6] LETTINGA G., Anaerobic Digestion For Energy Saving and Production, In : Energy From Biomass (CEC) Edit. W. PALZ, P. CHARTIER and D. O. HALL., Applied Science Publishers, 1981.
- [7] STEYLAERTS P., DECLERCK M., SCHMITZ B., ELSKENS I., A Downflow Fluidised Bed For The Anaerobic Conversion of Organic Wastes. In Second Symposium on Materials and Energy from Refuse (MER II), Antwerp, 20-22 october 81 ; part seven p. 19-24.

l'énergie totale, un exemple : le totem

1. INTRODUCTION

Face à la raréfaction des sources d'énergie d'origine fossile et devant la menace politique qui plane sur les approvisionnements en pétrole brut provenant des pays du golfe persique, les gouvernements, les entreprises, les particuliers des pays occidentaux ont réagi par de nombreuses mesures. Parmi celles-ci, on distingue deux courants : d'une part, une volonté de diversifier les sources : nucléaire, charbon, hydraulique, solaire, géothermie, biomasse, permettant non seulement de répondre aux besoins en cas de crise mais aussi de rendre minimale à chaque instant la fonction coût de l'énergie consommée ; d'autre part, une volonté de mieux employer l'énergie grâce à une politique d'utilisation rationnelle de l'énergie (URE) tant dans le secteur industriel, que domestique, que dans les transports.

L'énergie totale procède à la fois de ces deux courants. D'un côté, on peut faire de l'énergie totale à l'aide de nombreux combustibles et on concourt à la diversification des sources d'énergie, d'un autre côté, l'énergie totale conduit, comme son nom l'indique, à utiliser au maximum l'énergie introduite pour des besoins utiles, c'est donc une forme d'URE.

L'énergie totale est une notion très générale appelée à se développer dans le contexte de crise actuel.

Si on devait définir la notion d'énergie totale, on pourrait dire qu'il s'agit de tous les systèmes qui permettent à partir d'une quantité donnée d'énergie primaire de satisfaire les besoins en énergie sous une ou plusieurs autres formes, en rendant minimales les pertes dues aux irréversibilités lors des transformations successives.

Les systèmes les plus connus sont ceux où l'on obtient à partir d'un combustible primaire à la fois de l'électricité et de la chaleur. Cet exemple, que l'on appelle aussi *production combinée*, n'est qu'un aspect

de l'énergie totale. Il est cependant d'une importance essentielle dans notre structure industrielle. C'est pourquoi, dans la suite de cet article, on assimilera énergie totale à production combinée et c'est dans ce sens qu'on illustrera le concept d'énergie totale par une unité de production d'électricité et d'eau chaude de faible puissance : le TOTEM.

2. PRODUCTION COMBINÉE D'ÉLECTRICITÉ ET DE CHALEUR

La production d'électricité à partir d'énergie primaire nécessite la mise en œuvre d'un cycle dit «Moteur». Le second principe de la thermodynamique nous enseigne qu'il faut, pour réaliser un tel cycle, obligatoirement deux sources de chaleur : une source chaude où s'effectue l'apport de chaleur et une source froide où s'effectue l'extraction de la chaleur qui n'a pas été transformée en électricité. Cette extraction de chaleur à basse température ($T < 100\text{ °C}$) a généralement lieu dans un cours d'eau ou un réfrigérant atmosphérique.

Le rendement de l'opération de production d'électricité seule se situe à des valeurs de :

- 42% avec des moteurs Diesel ;
- 40% avec des turbines à vapeur à condensation ;
- 35% avec des moteurs à gaz ;
- 32% avec des réacteurs nucléaires du type PWR ;
- 30% avec des turbines à gaz ;
- 25% avec des moteurs à allumage commandé.

On a donc dans le meilleur des cas une perte d'énergie se montant à un peu moins de 60% de l'énergie entrante.

Si on désire utiliser la chaleur perdue pour du chauffage urbain, du chauffage horticole ou des applications industrielles, on peut envisager la mise en œuvre de :

- turbogroupes à contrepression (fig. 1) dont le rendement total est de 88% ,
- turbogroupes à condensation avec soutirage dont le rendement total avoisine les 50% (fig. 2),
- turbines à gaz avec chaudière de récupération sur les gaz d'échappement d'un rendement proche de 80% (fig. 3),
- moteurs à combustion interne avec récupération des chaleurs résiduelles avec des rendements de plus de 90% (fig. 4),
- cycles combinés, turbine à gaz/turbine à vapeur, Diesel/turbine à vapeur.

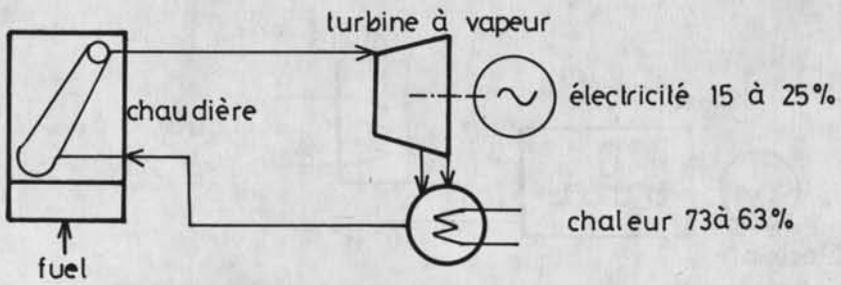


FIG. 1. - Turbogroupe à contrepression.

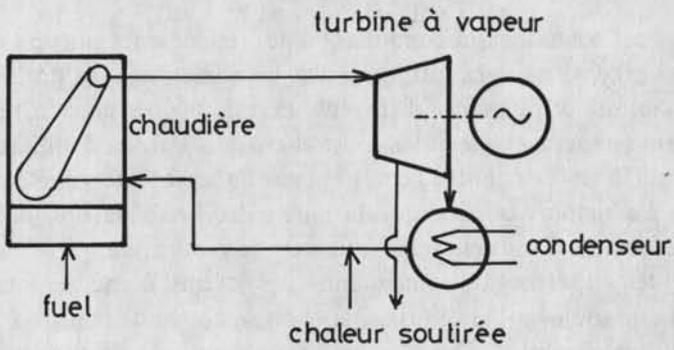


FIG. 2. - Turbogroupe à soutirage.

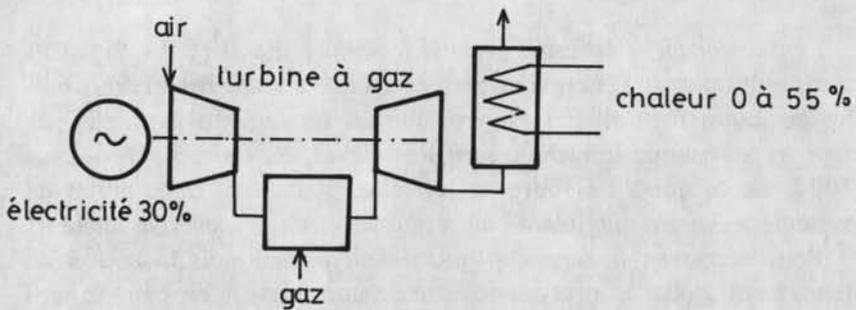


FIG. 3. - Turbine à gaz avec récupérateur.

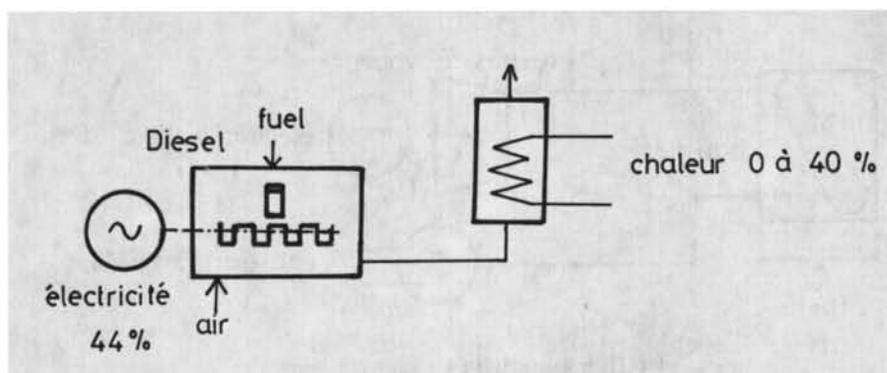


FIG. 4. – Diesel avec récupérateur.

Toutes ces solutions qui conduisent à des rendements globaux élevés (> 80%) excepté pour la turbine à vapeur à soutirage, se distinguent par les gammes de puissance, le niveau thermique de la chaleur récupérée, les investissements, les frais d'entretien, la souplesse d'utilisation et surtout par le rapport entre l'énergie thermique et l'énergie électrique fournie. Ce rapport qui indique la part entre l'énergie non noble et l'énergie noble est souvent appelé facteur de répartition.

Présentés en termes de rendement, les systèmes à énergie totale ne peuvent que soulever l'enthousiasme et on se demande pourquoi ils ne sont pas plus généralisés. La réponse à cette question se trouve bien sûr dans le prix de l'énergie, qui fut dérisoire jusqu'en 1973, mais aussi dans certains «pièges» qu'il faut dénoncer.

3. LES PIÈGES DE L'ÉNERGIE TOTALE

Le premier piège est assez grossier à déjouer. En effet, il est évident que l'utilisation de l'énergie ne peut être totale à cause des irréversibilités de toutes natures. S'il est vrai que les rendements exprimés par rapport à l'énergie introduite sont très élevés, on ne récupère jamais 100% de ce qui a été fourni au système. Il faudrait donc parler de système à *énergie maximale* plutôt que de système à énergie totale.

Pour découvrir *le second piège*, il faut approfondir la notion de rendement global et préciser les rendements partiels en énergie tant électrique que thermique, de même que le facteur de répartition. Ayant introduit dans le système une quantité d'énergie U et ayant récupéré de

l'énergie électrique (E), de la chaleur (Q), on peut écrire, compte tenu des pertes (P), le premier principe de la thermodynamique sous la forme :

$$U = E + Q + P$$

L'expression du rendement global devient :

$$\eta = (E + Q)/U$$

les taux de conversion partiels valent respectivement :

$$\alpha_e = E/U \quad \alpha_c = Q/U$$

le facteur de répartition s'exprime par :

$$\varphi = Q/E$$

Deux systèmes à énergie totale peuvent donc avoir un rendement global identique et des taux de conversion partiels fort différents. Cette remarque ne porterait pas à conséquence s'il y avait une équivalence complète entre travail et chaleur. Le second principe de la thermodynamique nous enseigne que cette équivalence n'existe pas. On peut toujours dissiper l'électricité dans une résistance avec un rendement pratique de près de 100 % tandis que pour obtenir de l'électricité à partir de chaleur, il faut mettre en œuvre un cycle dont le rendement est faible, d'autant plus faible que la chaleur est à basse température.

De nombreux auteurs ont proposé des expressions de rendement global permettant de mieux tenir compte de la différence entre les deux formes d'énergie. Parmi celles-ci, citons l'expression qui en première approximation attribue à la chaleur une «valeur» trois fois moindre que l'électricité ce qui conduit à exprimer le rendement global sous la forme modifiée :

$$\eta' = (E + Q/3)/U$$

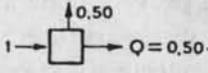
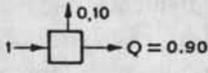
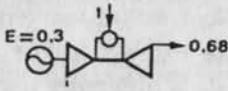
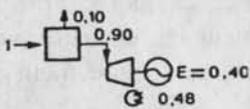
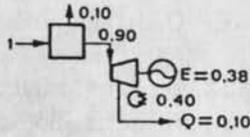
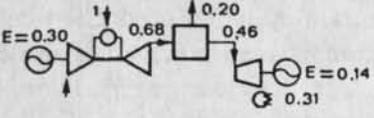
Cette expression trouve sa justification dans le fait que le kWh électrique est produit avec un rendement proche de 33 % soit 1/3 dans la centrale moyenne du parc en Belgique.

Le tableau I reprend plusieurs moyens de production de chaleur, d'électricité et de production combinée en précisant le rendement en électricité, le rendement en chaleur, le facteur de répartition, le rendement global, le rendement global modifié.

L'examen du tableau I indique que le rendement global le plus élevé ne coïncide pas avec le rendement global modifié maximal et que les valeurs les plus élevées sont atteintes avec le moteur Diesel.

TABLEAU I

Comparaison de systèmes énergétiques

Système	Energie entrante = 1	α_e	α_c	φ	η	η'
		E	Q	Q/E	E + Q	$E + \frac{Q}{3}$
Chaudière domestique		0	0,50	00	—	—
Chaudière industrielle		0	0,90	00	—	—
Turbine à gaz		0,30	0	0	—	—
Turbine à vapeur à condensation		0,40	0	0	—	—
Turbine à vapeur à condensation avec soutirage		0,38	0,10	0,26	0,48	0,41
Cycle combiné simple		0,44	0	0	—	—

Système	Energie entrante = 1	α_e	α_c	φ	η	η'
		E	Q	Q/E	E+Q	$E + \frac{Q}{3}$
Turbine à vapeur à contrepression		0,25	0,60	2,40	0,85	0,45
Cycle combiné à haut rendement		0,47	0	0	—	—
Turbine à gaz avec récupérateur		0,30	0,55	1,83	0,85	0,48
Cycle combiné à contrepression		0,40	0,42	1,05	0,82	0,54
Diesel avec récupérateur		0,44	0,50	1,14	0,94	0,61

Le troisième piège de l'énergie totale réside dans la concomitance de la production d'énergie électrique et thermique. Etant donné la simultanéité de la production de travail et de chaleur, il faut que le consommateur ait l'emploi de la totalité de l'énergie délivrée sous quelque forme que ce soit. Il n'en est généralement pas ainsi.

Deux solutions sont possibles :

- sous-dimensionner l'installation et faire appel à un appoint soit :
 - par le réseau pour l'électricité
 - par une chaudière pour la chaleur

- surdimensionner l'installation et dissiper l'énergie excédentaire
 - par des résistances pour l'électricité
 - par des aéroréfrigérants pour la chaleur.

Dans tous les cas, il s'en suit non seulement une chute du rendement global effectif mais encore un surcroît d'investissement qu'il faudra amortir. Un remède partiel peut être apporté grâce à l'utilisation de systèmes de stockage de l'énergie. Il faut dans ce cas tenir compte de problèmes de régulation, de contrôle, de surveillance accrus.

Le quatrième piège de l'énergie totale réside dans le prix du système. L'investissement au kW installé tant thermique qu'électrique est généralement plus important dans les systèmes à énergie totale, tout au moins dans les unités de petites tailles. Le surinvestissement peut être dans certains cas compensé par une économie en énergie primaire due au meilleur rendement global, un calcul de rentabilité est donc indispensable dans chaque situation.

Considérons à présent un exemple permettant d'illustrer concrètement la notion d'énergie totale.

Récemment, un grand constructeur automobile italien a lancé sur le marché un module permettant la production combinée de 15 kW électrique et de 40 kW thermique. Ce module a pour nom TOTEM : Total Energy Module. Il nous a semblé bien adapté à de nombreuses applications, c'est pourquoi l'Institut de Mécanique appliquée de l'ULB a entrepris l'étude de ses performances. Seule une étude complète de ce module au banc d'essai et une bonne connaissance de ses capacités devrait permettre selon nous de conseiller utilement les utilisateurs potentiels qui, rappelons-le, procèdent souvent d'un cas d'espèce.

4. LE MODULE TOTEM

4.1. *Structure*

Le module repose sur l'utilisation d'un moteur à piston classique équipé d'un générateur asynchrone pour la production d'énergie électrique et d'un système de récupération des chaleurs résiduelles pour la délivrance de l'énergie thermique. La figure 5 montre une vue perspective du module avec ses accessoires.

A partir du moteur à piston qui équipe d'origine le véhicule FIAT 127, il a été procédé aux modifications suivantes : le taux de compression a été porté à 10,5, l'arbre à cames a été modifié pour

optimiser le rendement à la vitesse de rotation fixée, l'allumage est du type sans rupteur à avance fixe.

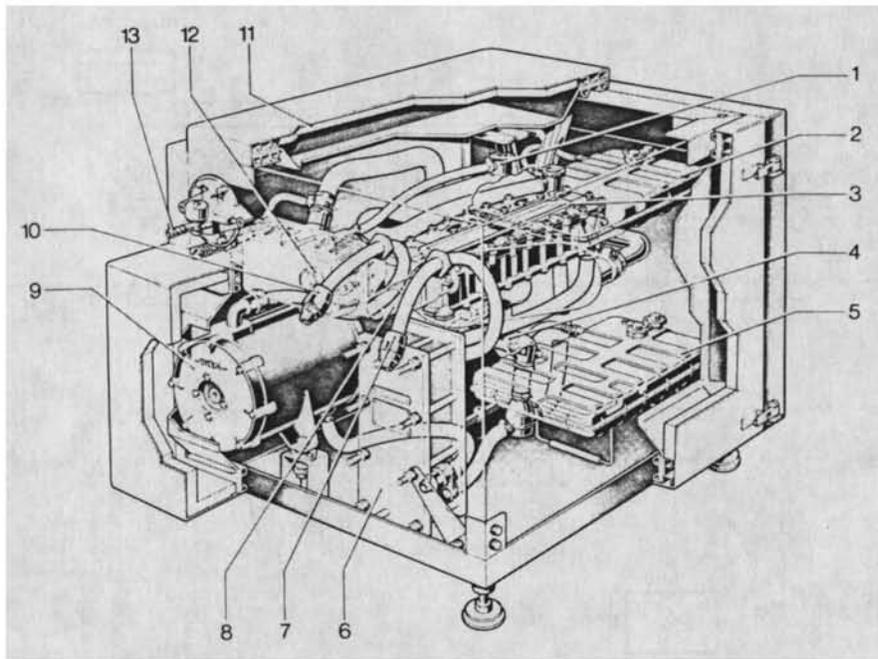


FIG. 5. - Vue éclatée du TOTEM.

- | | |
|--------------------------|-----------------------------------|
| 1. - Moteur thermique | 8. - Gaz brûlés |
| 2. - Réservoir d'eau | 9. - Moteur électrique |
| 3. - Echangeur gaz/eau | 10. - Entrée d'eau froide |
| 4. - Echangeur huile/eau | 11. - Isolation thermo-acoustique |
| 5. - Réservoir d'huile | 12. - Entrée d'air |
| 6. - Echangeur eau/eau | 13. - Alimentation en gaz |
| 7. - Eau chaude | |

Le combustible utilisé est normalement le gaz naturel mais on peut introduire également de l'éthanol, du biogaz, du méthanol, du gaz de gazogène, du GPL.

La figure 6 montre la disposition de principe des échangeurs de chaleur, et les températures atteintes au point nominal de fonctionnement. On remarque qu'un circuit primaire fermé récupère la chaleur successivement dans l'huile de graissage, l'eau de refroidissement des

cylindres, dans les gaz d'échappement. L'utilisateur reçoit les calories dans le circuit secondaire grâce à un échangeur de chaleur intermédiaire.

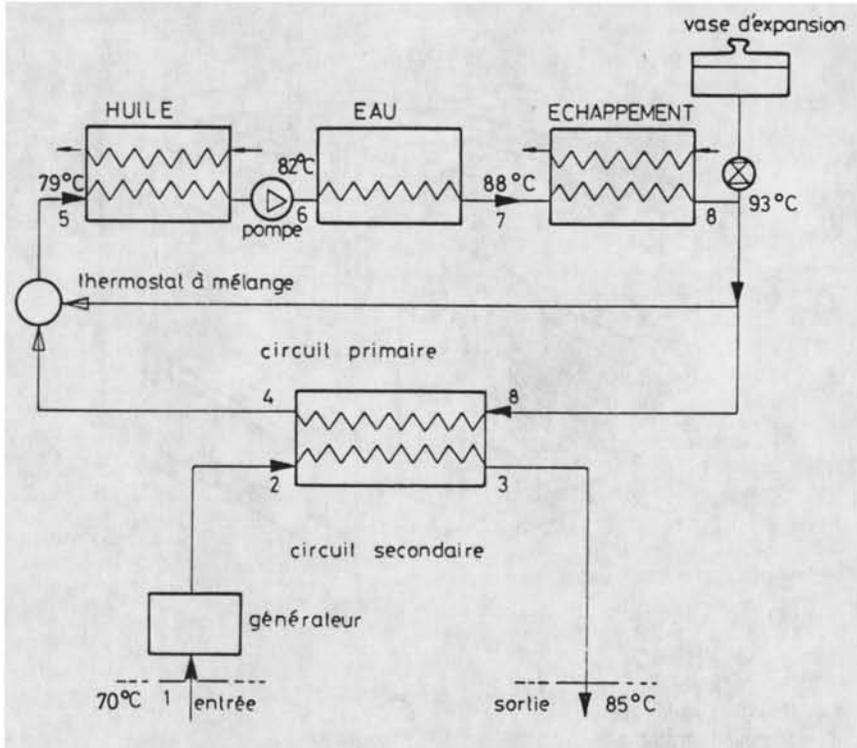


FIG. 6. – Disposition de principe des échangeurs.

L'échangeur huile permet de transférer 4,8 kW, la température de l'huile dans le carter étant voisine de 90 °C.

L'échangeur eau de cylindre transfère une puissance de 14,5 kW.

L'échangeur gaz d'échappement récupère 20 kW. Les gaz brûlés sont refroidis jusqu'à une température de 100 °C, une température plus basse provoquerait la condensation de l'eau dans le module.

4.2. Paramètres de réglage du module

4.2.1. Vitesse de rotation

Etant donné la fréquence du réseau électrique soit 50 Hz, la vitesse de rotation du moteur thermique s'établit aux alentours de 3050 tr/

min. Cela est dû aux caractéristiques électriques du générateur asynchrone comme l'indique la figure 7.

Le générateur électrique permet le démarrage du groupe car il agit en moteur en-dessous de 3000 tr/min. Au-dessus de cette valeur, il devient dynamo.

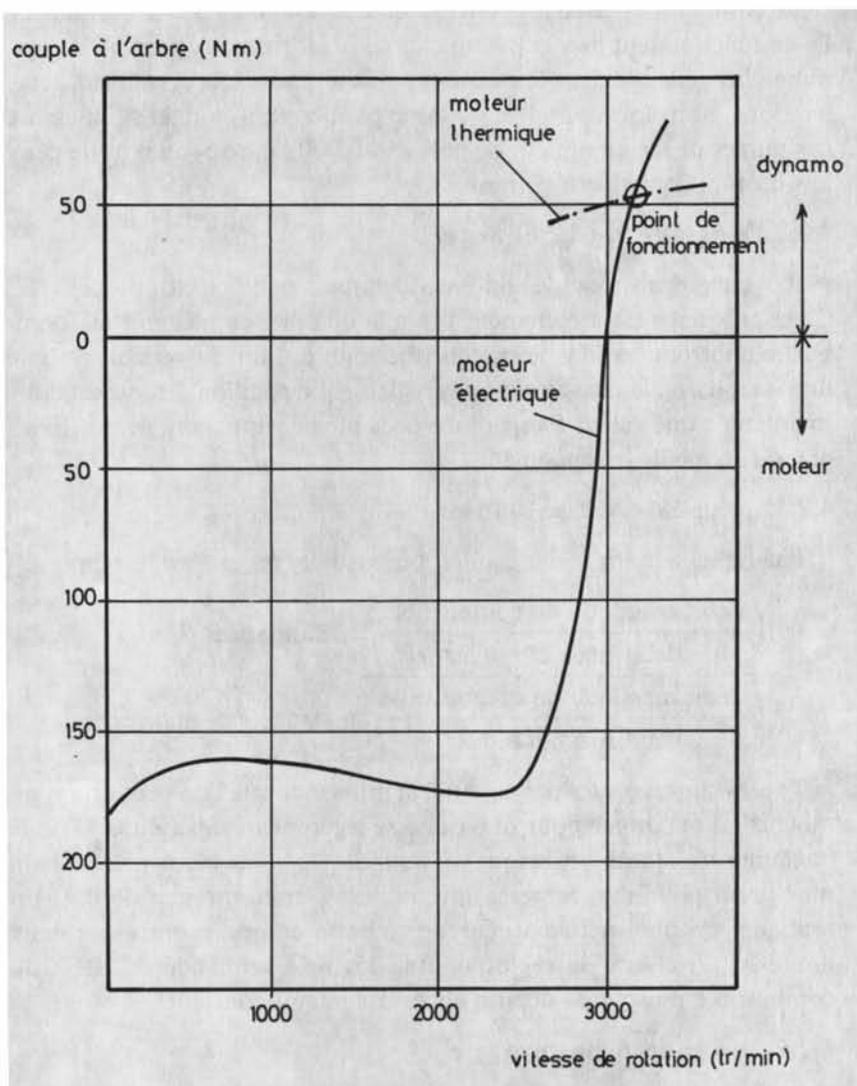


FIG. 7. - Choix de la vitesse de rotation.

Etant donné que le régime de rotation se situe à la moitié du régime de rotation maximal du moteur thermique soit 6000 tr/min, l'usure des pièces n'aura aucune commune mesure avec l'usure qu'on pourrait constater avec le même moteur placé dans un véhicule automobile. On peut donc recommander au lecteur de ne pas faire le calcul mental du nombre de km qu'aurait parcouru la voiture à l'allure du TOTEM. Cette comparaison est à proscrire, même si les moteurs sont identiques, ils ne fonctionnent ni à la même charge ni au même régime, ni de manière plus générale dans le même type d'utilisation (départ à froid, accélérations, transitoires ...). Il n'y a donc pas lieu de s'étonner si on assure des durées de vie de moteur de près de 20.000 heures, soit plus de deux ans en fonctionnement continu.

4.2.2. Réglage de la charge

Par charge du module, on entend la puissance électrique délivrée. Cette puissance est directement liée à la quantité de mélange air/combustible introduite dans le moteur thermique. Dans la version de base dite «standart», la charge n'est pas réglable. Le papillon des gaz est donc maintenu à une valeur fixe, proche de la pleine admission, de manière à obtenir le meilleur rendement.

4.2.3. Richesse du mélange

Par richesse d'un mélange air/combustible, on entend le rapport :

$$r = \frac{\left(\frac{\text{débit massique de combustible}}{\text{débit massique d'air}} \right) \text{mélange réel}}{\left(\frac{\text{débit massique de combustible}}{\text{débit massique d'air}} \right) \text{mélange stoechiométrique}}$$

Toutes choses égales par ailleurs, la puissance que l'on peut tirer d'un moteur est maximale pour une richesse légèrement supérieure à l'unité (mélange dit stoechiométrique). Toutefois, le rendement présente un maximum pour une richesse inférieure à l'unité, proche de 0,9. En pratique, on choisit une valeur de richesse comprise entre ces deux limites. La richesse se règle par une vis de commande du débit du combustible puisque le débit d'air est maintenu constant.

4.2.4. Avance à l'allumage

Le moteur est équipé d'un dispositif d'allumage à avance fixe calibré pour obtenir la puissance maximale.

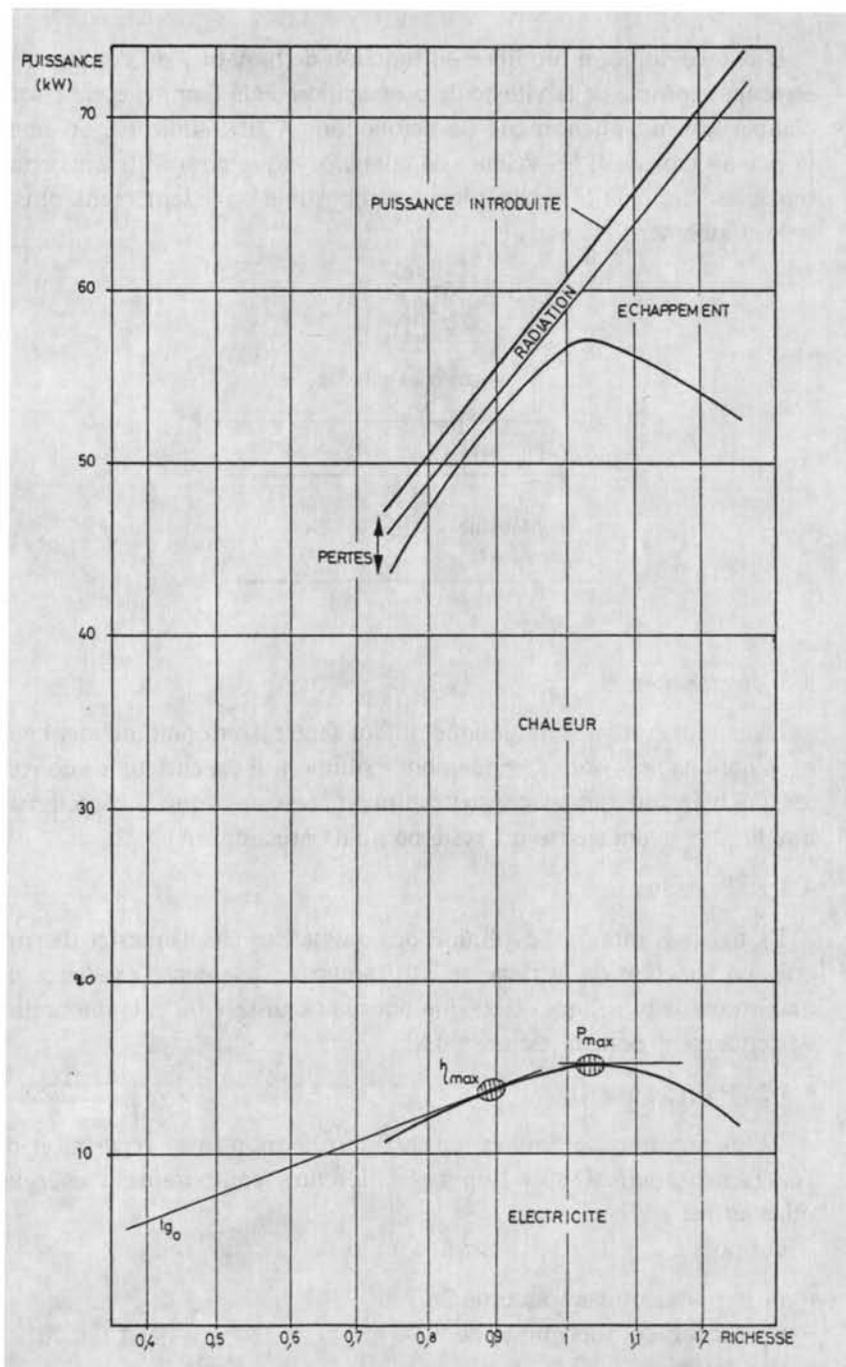


FIG. 8. - Puissance en fonction de la richesse.

L'avance doit être modifiée en fonction de la nature du combustible en tenant compte de la vitesse de propagation de la flamme et du risque d'apparition du phénomène de détonation. A titre indicatif, on mentionne au tableau II les valeurs de bonne pratique pour différents combustibles. En règle générale, plus le combustible brûle lentement, plus il faut augmenter l'avance.

TABLEAU II

Avance à l'allumage	
Combustible	Avance (°V)
GPL	20
Méthane	30
Biogaz	40

4.3. Performances

Dans tout système énergétique, il faut s'intéresser conjointement aux trois notions : puissance, rendement, pollution. Il est curieux de constater que bien souvent les constructeurs ne présentent que la caractéristique la plus avantageuse du système qu'ils préconisent.

4.3.1. Puissance

La figure 8 montre l'évolution des puissances électriques et thermiques en fonction de la richesse. On remarque aisément l'existence du maximum de puissance électrique pour la richesse 1,03 et le maximum de rendement pour la richesse 0,9.

4.3.2. Rendement

Le diagramme de Sankey de la figure 9 montre la répartition de l'énergie primaire (100 %) en ces différentes composantes : énergies utiles et pertes.

On note :

- un rendement électrique de 26,7 %
- un rendement thermique de 70 %
- des pertes de 3,3 %

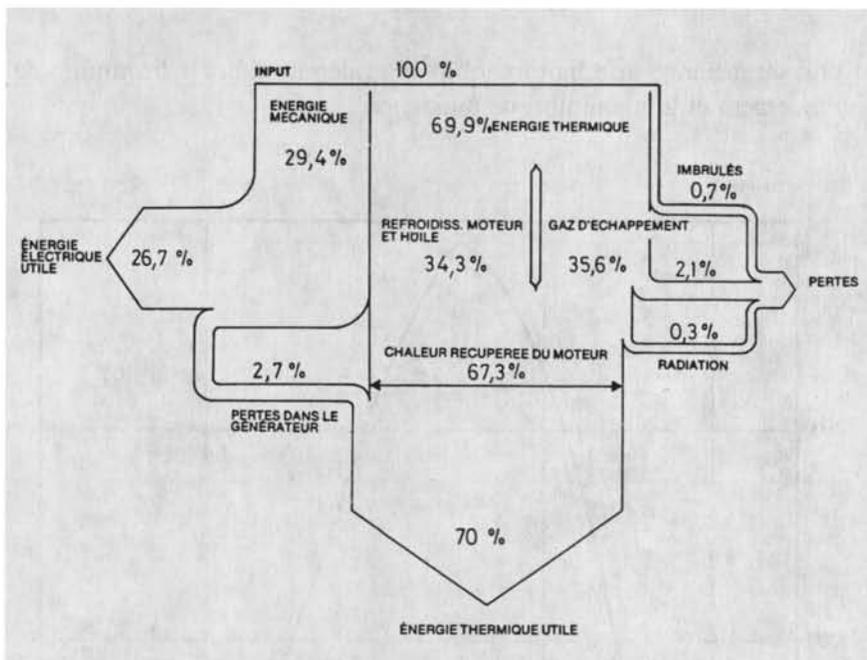


FIG. 9. – Bilan d'énergie.

Les pertes se décomposent en :

- imbrûlés 0,7%
- échappement 2,1%
- radiation 0,3%

Ces valeurs conduisent à un rendement total de 96,7%.

Le taux de conversion en électricité est inférieur aux valeurs généralement rencontrées dans d'autres convertisseurs (voir tableau I), de même, le taux de conversion en chaleur est plus faible que celui d'une chaudière correspondante. Il n'empêche que l'association des deux composantes énergétiques électricité et chaleur est obtenue avec une efficacité remarquable.

4.3.3. Pollution

L'évolution des émissions de CO et de NO en fonction de la richesse est donnée à la figure 10. On remarque l'existence d'un maximum de NO pour la richesse 0,95 et la croissance du CO pour des richesses supérieures à l'unité. La zone optimale pour la pollution est donc située

près du mélange stoechiométrique soit également entre le maximum de rendement et le maximum de puissance.

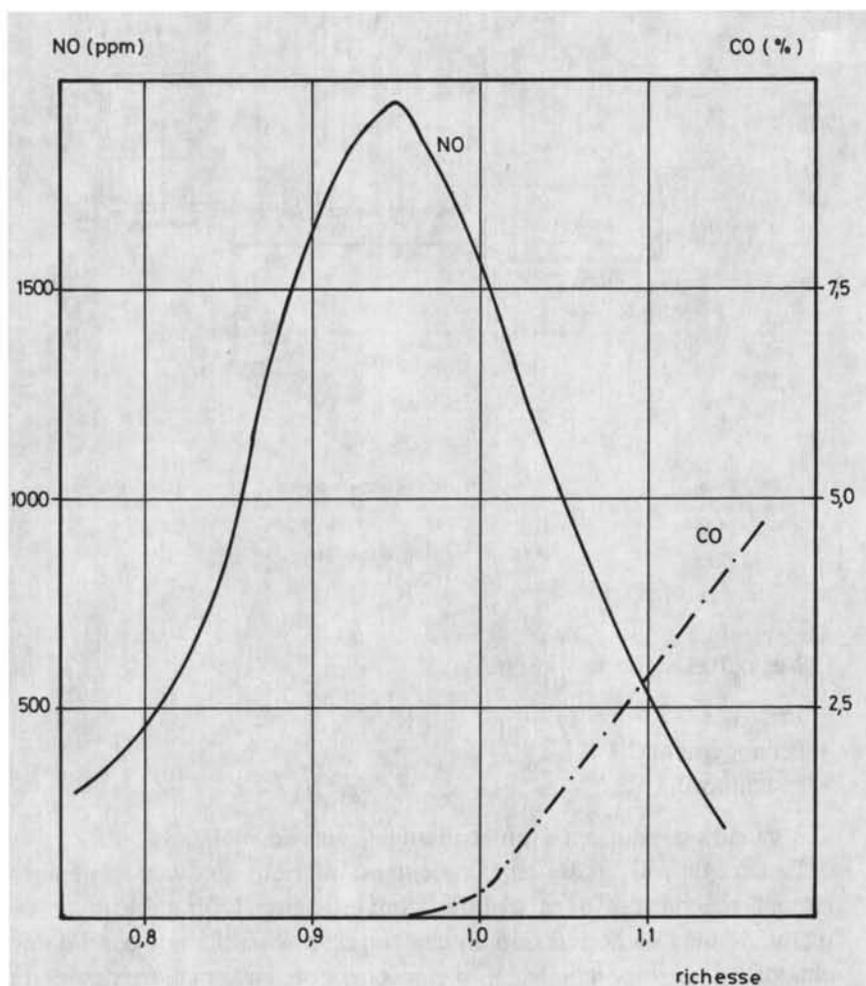


FIG. 10. – Emissions polluantes.

4.4. Quelques problèmes liés à l'utilisation

4.4.1. Température de l'eau chaude

Dans sa conception actuelle, la température maximale de sortie de l'eau chaude est 85 °C. Ce niveau de température est largement suf-

fisant pour des besoins de chauffage mais pourrait s'avérer trop faible pour des applications industrielles. Il est possible, moyennant une légère chute de rendement de fonctionner avec une température de sortie de 94 °C.

4.4.2. Variation de la puissance électrique

Actuellement, la puissance électrique débitée est constante. Il en va de même du rapport énergie thermique/énergie électrique qui vaut 2,62.

L'utilisateur doit donc disposer d'un moyen pour dissiper l'énergie excédentaire soit électrique soit thermique comme il a été dit au paragraphe 3, si les diagrammes de charge tant électriques que thermiques ne coïncident pas.

4.4.3. Indépendance vis-à-vis du réseau

Dans la situation présente le module démarre grâce à l'énergie puisée dans le réseau. C'est également le réseau qui fixe la vitesse du synchronisme en fournissant l'excitation du générateur asynchrone. Des études ont conduit à développer tout récemment un TOTEM dit «indépendant» possédant une excitation propre, un démarreur par batterie, une régulation de vitesse de manière à pouvoir fonctionner soit comme groupe de secours, soit comme groupe électrogène dans des régions éloignées de toute infrastructure énergétique classique.

4.4.4. Influence de la nature du combustible

Lorsqu'on change la nature du combustible, il faut modifier la richesse du mélange combustible et l'avance à l'allumage. Cependant, même avec une valeur optimale de ces deux paramètres, *la puissance* recueillie à l'arbre dépend du combustible. Le graphique de la figure 11 illustre cette chute de puissance de même que la répartition de l'énergie introduite pour divers combustibles ; une qualité remarquable du module est de conserver un *rendement* global très élevé, pratiquement indépendant de la nature du combustible.

4.4.5. Rentabilité du module

Le tableau III indique un exemple de calcul d'amortissement d'un module TOTEM. Ce calcul est basé sur un prix du kWh électrique de 3 FB, un prix de la chaleur de 1 FB/kWh, un prix du gaz naturel de 6 FB le m³. Il conduit à amortir le TOTEM en huit mois à raison d'un

fonctionnement continu. Une telle étude de rentabilité doit être menée dans chaque cas, en fonction des conditions particulières à chaque utilisateur.

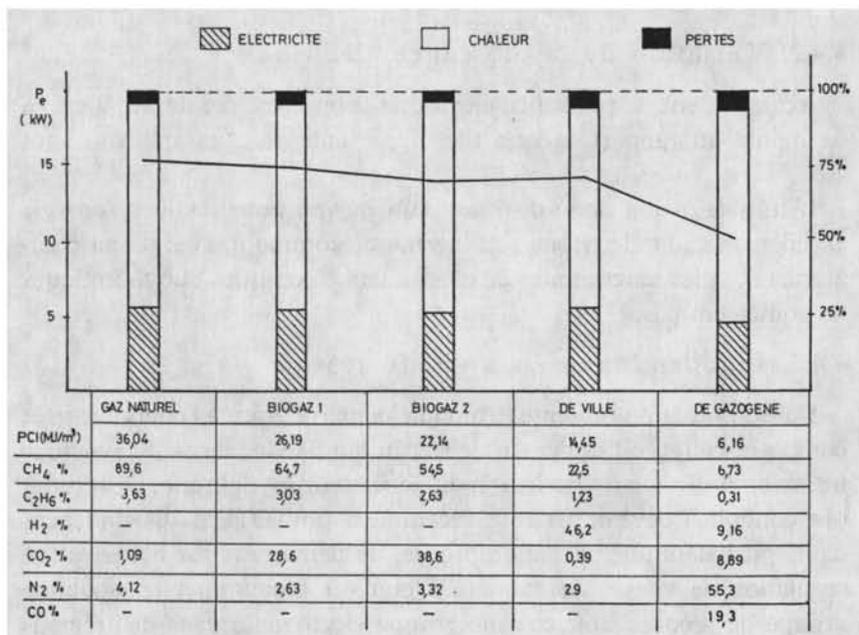


FIG. 11. — Influence de la nature du combustible.

5. PERSPECTIVES D'UTILISATION DU TOTEM

Le module TOTEM peut être employé dans de nombreux secteurs :

- domestique : chauffage d'immeubles, conditionnement d'air ...
- industriel : industries alimentaires, de transformation ...
- tertiaire : hôtellerie, restauration ...
- agriculture ...
- etc.

Il existe de très nombreuses situations où on a besoin simultanément d'électricité et de chaleur dans la gamme de puissance de 0 à 150 kW ce qui est accessible par un nombre de TOTEM compris entre 1 et 10. Au-delà, il existe des systèmes de plus grosses tailles unitaires qui permettent une diminution des frais tant d'investissement que d'exploitation.

TABLEAU III

Amortissement d'un TOTEM

AMORTISSEMENT DE L'INSTALLATION		
Investissement	I_0	225.000 (FB)
Coût horaire : gaz	C_1	33 (FB)
entretien	C_2	10 (FB)
Recette horaire : Electricité	R_1	46 (FB)
Chaleur	R_2	40 (FB)
<i>Valeur actualisée nette</i>		
$V.A.N. = -I_0 + \sum_{p=1}^N \frac{1}{(1+a)^p} \cdot (R_1 + R_2 - C_1 - C_2) \cdot \text{nbr. d'heures par an}$		
	Nombre d'heures par an	Durée d'amortissement
	3000	1,975
	4000	1,44
	5000	1,14
	6000	0,94
	7000	0,80
	8000	0,70
	8760	0,63

Sur le plan de l'utilisation pratique, la Belgique est en retard sur d'autres pays comme l'Italie, la Suisse, l'Autriche où plus de 600 TOTEM sont déjà en activité.

De nouvelles applications voient le jour dès qu'est franchie la barrière psychologique de la résistance au changement et dès que les producteurs-distributeurs d'énergie électrique n'adoptent pas des attitudes résolument anti-autoproducteurs.

Parmi les différents secteurs concernés, il en est un qui a beaucoup agité les esprits ces derniers temps, il s'agit de l'agriculture où l'on peut produire et consommer du «biogaz». Si le côté spectaculaire du fermier en autonomie énergétique a suscité en engouement certain, il est vrai que les conditions d'une valorisation convenable du potentiel du TOTEM sont rarement atteintes. Dans cette application, la chaleur issue

du TOTEM est utilisée en grande partie pour maintenir le digesteur à sa température optimale de fonctionnement, soit 35 °C.

Des estimations grossières indiquent qu'une unité de gros bétail (UGB) produit journallement de la matière sèche pouvant être digérée dans un digesteur de 1 m³ et qu'il s'en suit la production de 1 m³ de biogaz (60 % CH₄-40 % CO₂).

Le TOTEM consommant 10 m³ par heure d'un tel gaz, il faut pour une journée complète disposer de 80 UGB ce qui est bien au-dessus de la moyenne des exploitations agricoles belges. Ce mode d'utilisation du TOTEM n'est donc pas près de se développer dans notre pays, d'autant plus que le bétail n'est pas toute l'année en stabulation.

Pour remédier aux problèmes que l'on rencontre dans toutes les applications de l'énergie totale, c'est-à-dire : la concomitance des besoins en électricité et en chaleur, le rachat de l'énergie électrique excédentaire, on a pensé à une solution actuellement expérimentée dans les laboratoires de l'Institut de Mécanique appliquée de l'ULB.

Laissant de côté les applications marginales comme le biogaz, on a développé le couplage TOTEM-pompe à chaleur (PAC).

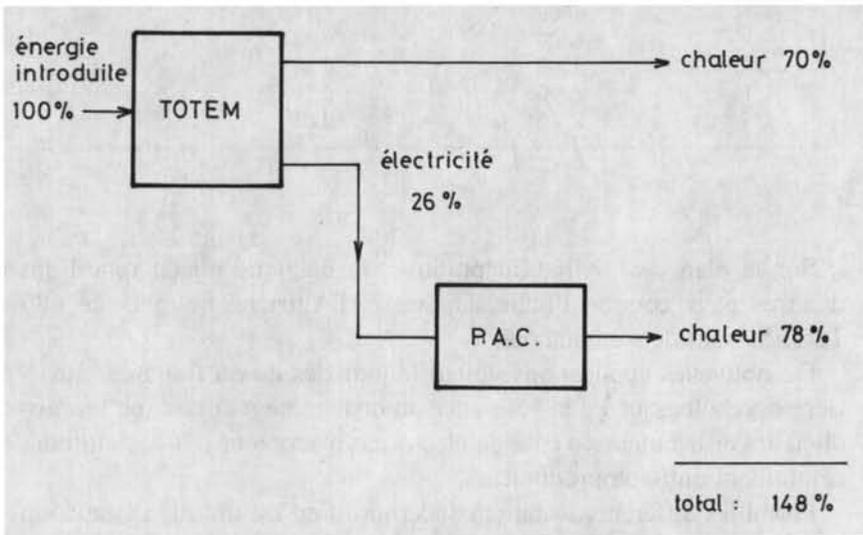


FIG. 12. - Couplage TOTEM - pompe à chaleur.

Dans cette solution illustrée à la figure 12, l'énergie électrique produite par le TOTEM est utilisée entièrement pour l'entraînement du

compresseur de la PAC. Celle-ci, grâce à son coefficient de performance pris égal à trois dans l'exemple traité, restitue sous forme de chaleur trois fois plus d'énergie qu'elle en a reçu sous forme électrique. Le bilan global montre donc que pour 100 % d'énergie primaire brûlée dans le TOTEM, il est possible de récupérer sous forme de chaleur près de 150 %.

Dans une étape ultérieure, on peut penser utiliser une PAC à absorption réversible de telle manière qu'on produise du froid en été et de la chaleur en hiver. Il y a donc un champ très large de possibilités d'applications dans le domaine du conditionnement d'air.

Seules des solutions de plus en plus sophistiquées faites de l'association de plusieurs machines permettront de mieux valoriser le potentiel énergétique de l'énergie primaire importée en attendant que d'autres sources prennent le relais.

Les systèmes à énergie totale avec le rendement très élevé qui les caractérise, sont certainement une partie de la solution à court terme au problème de notre approvisionnement en énergie.

Dans ce sens, le TOTEM et les systèmes basés sur les mêmes principes offrent des possibilités que nul ne peut négliger.

les risques et les coûts sociaux associés à la production d'énergie : problèmes actuels

1. INTRODUCTION

Je m'écarterai, aujourd'hui, de la présentation traditionnelle que je fais depuis deux ans sur ce sujet et qui consiste à présenter des tableaux comparatifs des risques des différentes formes d'énergie. Etant donné qu'il s'agit ici d'introduire une licence universitaire, je crois préférable d'insister sur la méthodologie de l'analyse du risque et des coûts sociaux et de mettre en évidence quelques-unes des multiples facettes de ce problème complexe.

Les antécédents de l'analyse du risque sont fort anciens puisque apparemment la première étude d'impact doit être trouvée dans le traité d'Agricola : *De re metallica*, publié en 1556. Les industries minières et chimiques ont une longue familiarité avec le risque et la manière de l'appriivoiser. Mais ce sont essentiellement l'industrie aéronautique et surtout nucléaire qui ont fait faire des progrès décisifs à la méthodologie du risque et l'ont portée à maturité.

La notion de risque est généralement associée à celle de dommage potentiel aux hommes et aux biens.

Lorsque nous avons à comparer plusieurs solutions possibles nous devons prendre en considération non seulement le coût économique interne, mais l'ensemble des coûts externes ou coûts sociaux qui ne sont généralement pas supportés par le producteur.

C'est à quelques aspects de l'évaluation des risques et coûts sociaux de la production d'énergie que je consacrerai cet exposé.

2. LES MÉTHODES D'ANALYSE DU RISQUE

– Les techniques probabilistes

Il est évidemment exclu de donner, en si peu de temps, un aperçu même sommaire de la méthodologie de l'analyse du risque. Donnons

seulement une idée des méthodes probabilistes utilisées pour déterminer la fiabilité d'une machine aussi complexe qu'un réacteur nucléaire. La défaillance d'un organe est susceptible d'entraîner, avec une certaine probabilité, la défaillance d'autres organes, etc.

L'analyse de la fiabilité se fait par l'intermédiaire de graphes ou arbres :

Arbres d'événements

On part d'un événement initiateur : rupture d'une canalisation, erreur d'un opérateur, etc. et on retrace toutes les conséquences de cet événement ; des embranchements apparaissent, chaque branche ayant une certaine probabilité d'apparition, les branches n'étant d'ailleurs pas exclusives, l'accident pouvant se propager par divers chemins. Dans un système aussi complexe qu'un réacteur, le nombre de branches peut être énorme. Bien entendu, les sûretés prévues ont pour but d'arrêter la propagation d'un accident au travers du système. La construction d'un arbre d'événements a pour but notamment de mettre en évidence des points faibles du système de protection. Il faut tenir compte aussi du fait que les systèmes de protection peuvent être eux-mêmes défaillants, la protection contre ces défaillances résidant essentiellement dans la redondance.

Arbres de défaillances

Ils débutent par la définition de l'événement non désiré et il remonte depuis cette racine jusqu'aux causes possibles de cet événement, causes ayant elles-mêmes d'autres causes etc. jusqu'au moment où on arrive à la défaillance d'un composant élémentaire ou à une erreur humaine. Il faut alors quantifier les probabilités de ces défaillances, tâche relativement aisée dans le cas d'un composant élémentaire pour lequel on dispose de statistiques suffisantes, mais beaucoup plus difficile dans le cas d'erreurs humaines.

La figure 1 donne un arbre d'événement simplifié pour un accident de référence constitué par la perte brusque de réfrigérant (LOCA) dans un réacteur nucléaire [1]. La rupture d'une canalisation est suivie ou non par une perte de l'alimentation électrique, suivie ou non du fonctionnement du refroidissement de secours, du rabattement des gaz radioactifs et du confinement réussi ou non dans l'enceinte de la centrale. La branche supérieure représente la réussite de l'action, la branche inférieure représente l'échec. La probabilité d'une séquence peut donc

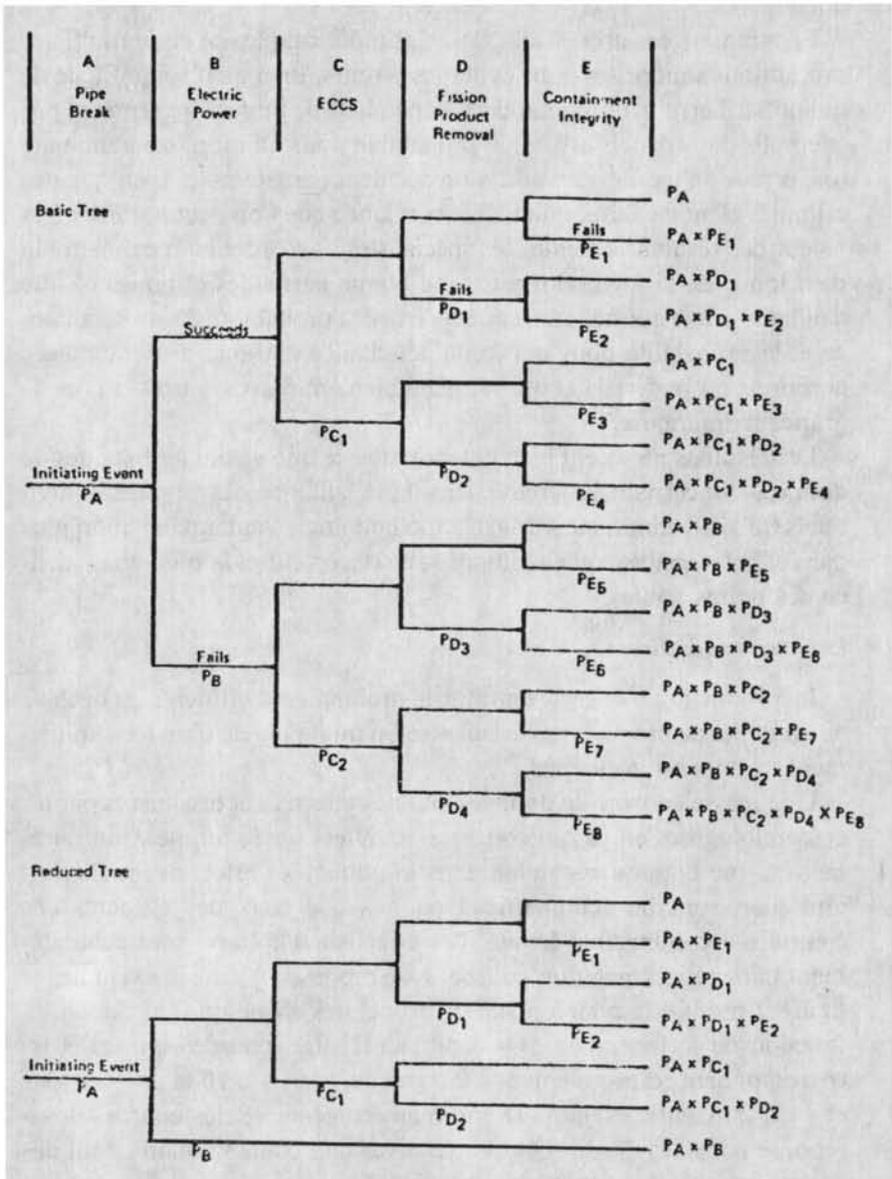


FIG. 1.

être évaluée à partir des probabilités de défaillance des actions individuelles.

En pratique ces arbres sont d'une grande complexité et de multiples précautions sont prises pour éviter les erreurs. Bien qu'il soit difficile de quantifier l'erreur humaine, il est cependant possible d'incorporer, par exemple, dans de tels arbres, la probabilité pour qu'un pilote commette une erreur en cas de stress dû à un accident par exemple. Bien que des critiques aient été faites quand à la confiance que l'on peut accorder à la valeur des résultats obtenus, les spécialistes s'accordent à reconnaître le bien fondé de la méthodologie. Une bonne partie des critiques résulte d'ailleurs d'une confusion fréquente entre la probabilité d'une défaillance et la probabilité pour que cette défaillance entraîne des dommages corporels ou matériels et qui est généralement deux ou trois ordres de grandeur inférieure.

Les résultats ne valent bien entendu que ce que valent les banques de données concernant les fréquences de défaillance des organes individuels (relais, vannes, etc.). Mais la méthodologie vaut autant sinon plus par l'effort d'analyse qu'elle impose au concepteur et la mise en évidence des points faibles.

Les coûts sanitaires

La production d'énergie entraîne la production d'effluents ou déchets de nature et de proportion variables selon qu'il s'agisse d'un fonctionnement normal ou accidentel.

Une masse énorme de données ont été collectées et organisées par les épidémiologistes en ce qui concerne les effets sur l'homme. Contrairement à une opinion répandue dans le public, les effets des radiations ionisantes sont beaucoup mieux connus que ceux des effluents des centrales à combustible fossile. Les effets sur l'homme sont généralement caractérisés par une courbe dose-réponse. A titre d'exemple, la figure 2 montre le pourcentage de bronchites chroniques au Japon en fonction de la teneur en SO_2 dans l'air [2]. Les courbes (a), (b) et (c) correspondent respectivement à 0 cigarette/jour, 1 à 10 cigarettes/jour et 11 à 20 cigarettes/jour. D'une manière générale, les courbes dose-réponse adoptées dans les études relatives aux coûts sanitaires sont des droites avec seuil. La précision mathématique des équations ne doit pas faire illusion : les incertitudes sont considérables.

Disons aussi que les coûts sociaux comportent, outre les coûts sanitaires, bien d'autres coûts qui résultent de la dégradation des bâtiments

ou encore des coûts difficilement quantifiables tels que les dommages esthétiques.

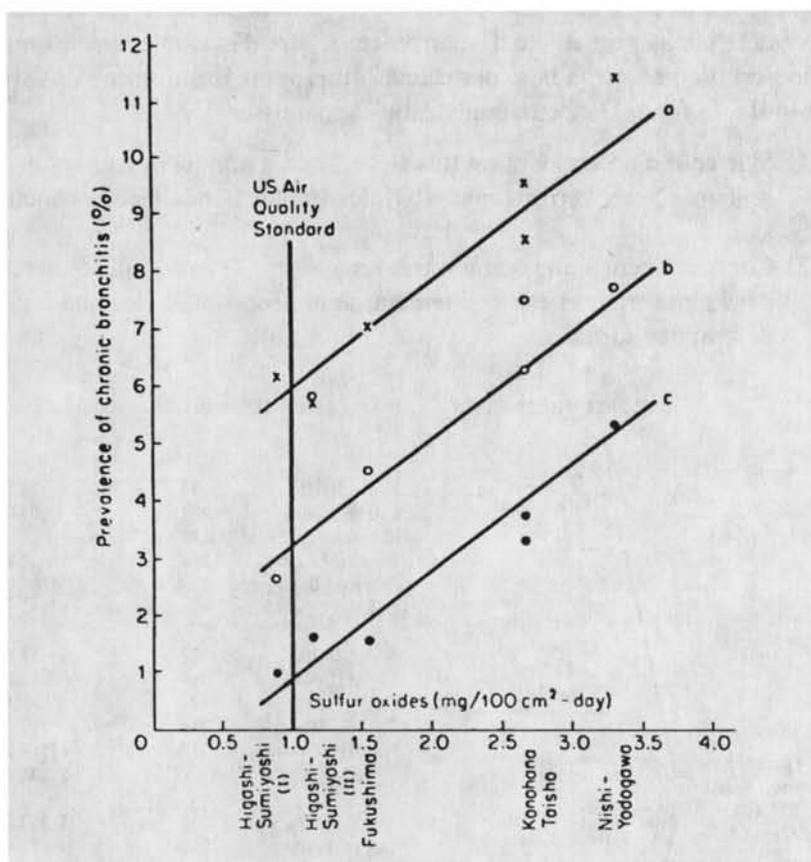


FIG. 2.

Evaluation des coûts sociaux

Toute évaluation des coûts sociaux en termes monétaires et évidemment tributaire d'une estimation du coût de la maladie, de l'invalidité ou de la vie humaine. Le problème difficile d'évaluer le prix de la vie humaine est bien connu des économistes mais sa seule évocation provoque souvent des refus passionnés. Toutefois de nombreuses décisions, ou absences de décisions, comportent des estimations implicites de la valeur de la vie, telles que les décisions d'améliorer ou non la sécurité routière sur certains tronçons dangereux.

Dans le cas des accidents de référence des réacteurs nucléaires, c'est la combinaison des modèles probabilistes de défaillances et des modèles épidémiologiques qui permet d'estimer le coût social d'un accident pondéré par sa probabilité d'occurrence. A titre d'exemple, une estimation est donnée sur la base des calculs du rapport Rasmussen (WASH-1400) à la figure 3. Deux conclusions apparaissent [3] :

- (1) Si le coût d'un accident est très élevé, le coût annuel moyen est insignifiant. Nous verrons, plus loin, les implications de cette conclusion.
- (2) Contrairement à une opinion très répandue, 84 % du coût résulte de dégâts matériels et essentiellement de la nécessité de décontaminer de grandes surfaces.

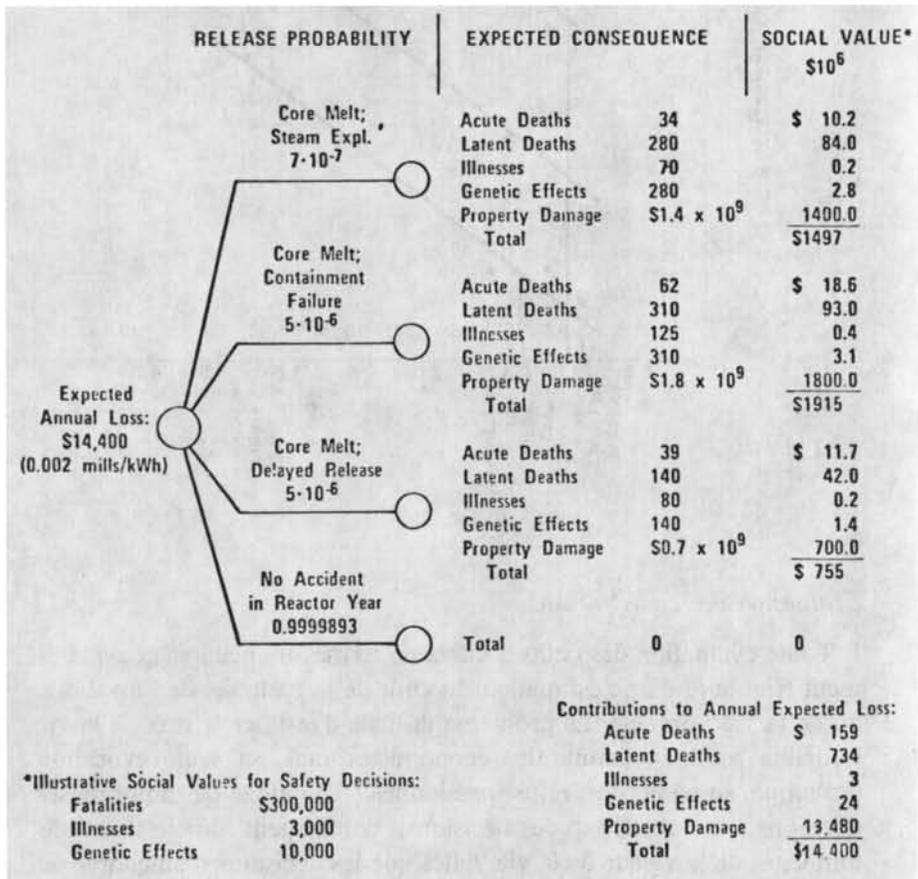


FIG. 3.

3. LES AMBIGUITÉS ET LES PARADOXES DE L'ANALYSE DU RISQUE

Le problème du risque énergétique – et plus particulièrement du risque nucléaire – est actuellement chargé d'émotions. Il n'est donc pas surprenant que l'intuition se trouve souvent prise en défaut comme les quelques exemples ci-dessous le suggèrent.

– *Est-il vrai que toute mesure de sécurité est nécessairement bénéfique [4]*

Considérons un problème hypothétique : une défaillance potentielle d'un réacteur nucléaire a une chance sur dix mille par an de produire une fusion du cœur ; elle peut être éliminée après des travaux qui retardent d'un mois la mise en service. Faut-il éliminer cette défaillance ? Les chiffres hypothétiques ont été choisis de manière telle que la décision ne fait aucun doute : la probabilité très surestimée est en réalité de l'ordre d'une chance par 100.000 (voir figure 4) et le délai est très court. En fait, le tableau comparatif des risques (figure 4) aboutit à des conclusions tout à fait opposées.

On peut lire :

- dans la première colonne, le bénéfice résultant de l'élimination du risque nucléaire
 - suppression des effets de l'accident nucléaire
 - suppression des effets de la centrale au charbon qui remplacera la centrale nucléaire accidentée
- dans la seconde colonne, le détriment causé par la prolongation du fonctionnement d'une centrale au charbon en voie d'être déclassée pendant le mois de retard
- dans la troisième colonne, le bénéfice net.

En comparant les choses comparables : décès avec décès, etc., le bénéfice est très négatif. Et pourtant, la décision que prendrait l'organisme de contrôle ou l'autorité publique serait sans aucun doute possible le retard d'un mois. Ceci ne signifie pas pour autant que cette décision soit « irrationnelle » : bien d'autres choses interviennent dans la prise de décision, y compris la manière dont une décision sera comprise. L'exemple illustre aussi la double échelle de valeurs : les normes de sécurité d'industries voisines ont un fondement plus historique que logique. En outre, le risque de ce qui existe déjà est considéré comme

acquis et donc non comparable à un risque à venir et sur lequel nous pouvons agir.

Public Health and Safety Cost-Benefit Assessment of Nuclear Plant Delay
(Assuming a 10^{-4} per reactor-year probability of core meltdown can be eliminated by one-month delay per reactor)

	"Benefit of Reduced Hypothetical Nuclear Risk" (Effect Eliminated)	"Cost of Fossil Substitution" (Effect Caused)	Net Benefit
Deaths			
Traffic fatalities (fuel transportation)	0.9	3.7	-2.8
Acute radiation fatalities	0.12	0	0.12
Other premature deaths	123	169	-46
Illness			
Acute radiation sickness, cases	8.0	0	8
Thyroid nodules, cases	830	0	830
Chronic respiratory disease, cases	73 000 ^a	310 000	-237 000
Aggravated heart-lung disease symptoms, person-days	730 000 ^a	3 100 000	-2 370 000
Asthma attacks, cases	150 000 ^a	640 000	-490 000
Childrens respiratory disease, cases	18 000 ^a	75 000	-57 000

^aCaused by fossil replacement of nuclear power for 20 years following a core meltdown.

Notes:

1. Applies to 210 nuclear units [203.6 GW(e)] totaling 2080 reactor-years of operation through 1990 (60% capacity factor assumed).
2. Replacement power assumed to be generated equally by existing coal and oil units representative of current practice.
3. Direct impact of meltdown and air pollution based on Refs. 2 through 5.
4. Application of stringent emission controls to existing fossil stations would reduce costs and most benefits by a factor of 6.
5. Health effects committed by 1990 are included even if they would appear after 1990 (such as latent cancer).
6. Consequence uncertainty factors are $\frac{1}{2}$ and 3 for average meltdown, and $\frac{1}{16}$ and 2 for fossil air pollution.

FIG. 4.

- Les victimes de Three Mile Island

L'analyse de la dose population (3.500 hommes-rem) ne laisse pas beaucoup de doutes sur les conséquences radiologiques de l'accident. D'après nos connaissances radiobiologiques synthétisées par exemple dans le rapport BEIR III, cette dose provoquera de l'ordre de 1 cancer mortel, 1 cancer non mortel (tous deux dans un délai allant de 15 à 45 ans) et une malformation congénitale sur toute la durée de la vie de la population considérée (environ 2 millions de personnes).

En fait, le chiffre des victimes sera beaucoup plus élevé, *non à cause de la radioactivité, mais à cause de la centrale au charbon ou au fuel qui actuellement, aux USA, fournit l'énergie électrique qui n'est plus*

produite par T.M.I. Cette conclusion paradoxale est la conséquence logique de la figure 3.

– *Les risques de l'électricité solaire*

L'énergie solaire étant aléatoire et les possibilités de stockage étant limitées, il faut prévoir une énergie d'appoint. Ceci suppose des investissements complémentaires en ce sens que l'installation de 100 MWe solaires ne déplacent pas 100 MWe classiques mais peut être 50 ou 70 selon l'ensoleillement.

Il faut donc tenir compte des risques liés à la construction et au fonctionnement de ces 50 MWe d'appoint produits essentiellement par des combustibles fossiles. En admettant même que la production d'électricité d'origine solaire est totalement dépourvue de risque – ce qui n'est pas vrai – le risque final pour le consommateur serait réduit à la moitié ou au tiers du risque de la production d'électricité par le charbon, ce qui n'est pas un ordre de grandeur de différence. On voit, par cet exemple, qu'il est essentiel de fixer très précisément le contexte dans lequel on parle de risque. Parler du risque d'une énergie sans envisager la totalité du risque et sans évaluer le risque de l'énergie de remplacement a autant de sens que de parler du risque de l'automobile lorsque celle-ci reste au garage.

– *Les risques des économies d'énergie*

Au risque de provoquer le lecteur, même les économies d'énergie ne sont pas nécessairement dépourvues de risque.

A titre d'exemple, le Département de l'Energie des USA (DOE) a passé contrat avec l'Université de Berkeley afin d'évaluer les risques dus aux économies d'énergie dans le bâtiment. Pourquoi ?

La réduction de la consommation d'énergie provoque évidemment la suppression des risques correspondants à la production ou aux investissements auxquels on peut renoncer. Mais la réduction de consommation dans le bâtiment se fait soit en augmentant l'isolation thermique, soit en diminuant la ventilation et le renouvellement d'air. Or les matériaux de construction laissent transpirer du gaz radon qui est radioactif au point que l'atmosphère respirée dans les habitations de plusieurs régions d'Europe donne une dose très supérieure à celle que les habitants sont susceptibles de recevoir des centrales nucléaires voisines. Sans qu'il soit possible de tirer déjà des conclusions en ce qui con-

cerne le bilan net, le problème a paru suffisamment important pour justifier une étude [5].

4. LES ÉTUDES D'IMPACT ÉNERGÉTIQUE

Montrons d'abord par quelques exemples le rôle potentiel d'une étude d'impact.

– Choix d'une centrale au charbon à New York

La meilleure façon d'illustrer une étude d'impact énergétique c'est de considérer un exemple tel que celui montré à la figure 5, les chiffres étant purement illustratifs [3].

Cost Elements	Plant Configuration		
	Appalachian Minemouth (High Sulfur Coal)	New York Location (Low Sulfur Coal)	New York Location (High Sulfur Coal and Flue Gas Desulfurization)
Economic:			
capital	12.1	12.1	14.6
operating	0.6	0.6	1.5
fuel	6.5	8.5	6.9
transportation	(AC line) 5.8	(unit train) 1.1	(unit train) 1.2
Economic Cost	<u>25.0</u>	<u>22.3</u>	<u>24.2</u>
Social:			
sulfur oxide	4.1	3.2	1.1
other coal	0.44	0.56	0.56
fuel cycle consequences			
Social Cost	<u>4.5</u>	<u>3.8</u>	<u>1.7</u>
Total Cost	29.5	26.1	25.9

Illustrative data; do not cite.

FIG. 5.

Trois solutions sont disponibles :

- (1) un charbon à haute teneur en soufre est brûlé localement dans une centrale électrique de la région des Appalaches et le courant électrique est transporté à New York
- (2) un charbon à basse teneur en soufre est brûlé à New York
- (3) un charbon à haute teneur en soufre est brûlé à New York et les gaz sont désulfurés partiellement.

La ventilation du coût économique fait apparaître un coût de capital supérieur pour la solution de désulfuration, un coût de transport plus élevé dans le cas où l'électricité est transportée et un coût plus élevé pour le charbon peu soufré.

Le coût social est plus important si aucune désulfuration n'a lieu. La figure montre clairement que la solution la plus «économique» n'est pas la même selon que l'on y incorpore ou non le coût social. En outre, si les bénéfices de la production de l'électricité sont toujours reçus par les mêmes personnes (les new yorkais) en revanche le détrimement n'est pas supporté par eux dans toutes les solutions. C'est évidemment toute la problématique du syndrome «n'importe où mais pas chez moi».

– *Emplacement optimal d'un parc de centrales thermiques et nucléaires*

Le choix optimal de l'emplacement d'une centrale électrique fait l'objet des soins attentifs de producteurs d'électricité. Mais l'optimum économique n'est pas le même selon que l'on tient compte ou non des coûts externes. Dans une étude récente [6], les coûts externes ont été pris en compte très grossièrement en évaluant pour chaque emplacement techniquement possible la «proximité» de la population, en multipliant la puissance de la centrale par le nombre d'habitants exposés dans un rayon de 50 miles. La figure 6 donne la position actuelle des centrales et la figure 7 une position améliorée, dans le sens d'une réduction des coûts externes.

Les éléments à prendre en considération sont, par exemple :

1. Capacité électrique requise.
2. Capacité maximum par cellule.
3. Limite supérieure à la capacité côtière.
4. Demande électrique en un site.
5. Offre électrique.
6. Limite à la production de charbon.
7. Demande de charbon fonction du facteur de charge.
8. Consommation d'eau.
9. Perte d'eau.
10. Contraintes diverses de consommation.
11. Pollution thermique.
12. Qualité de l'air.
13. Contrainte de population.

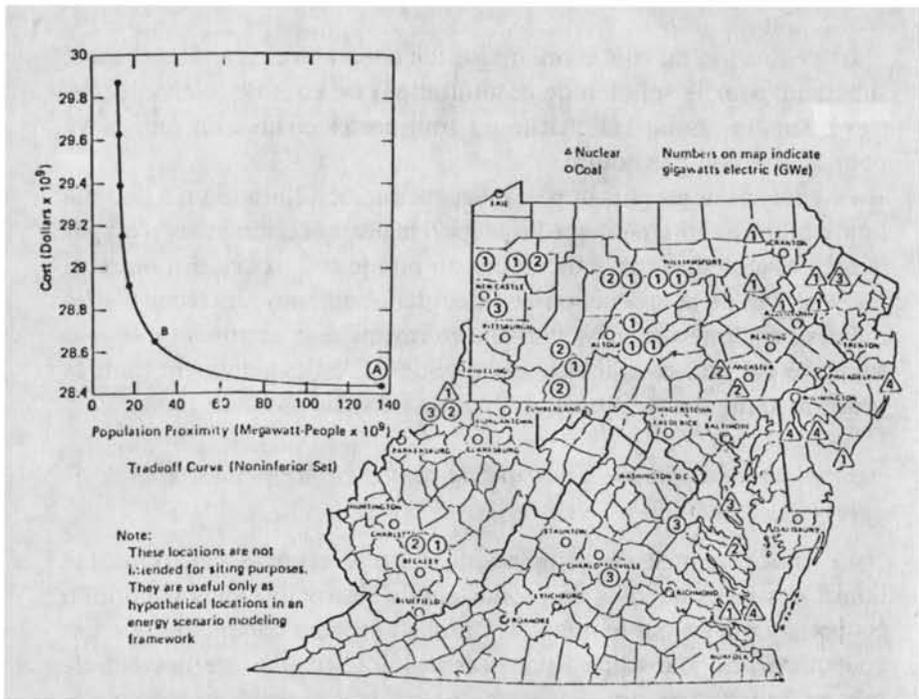


FIG. 6. – Position des centrales pour le coût interne minimum (point A) [6]

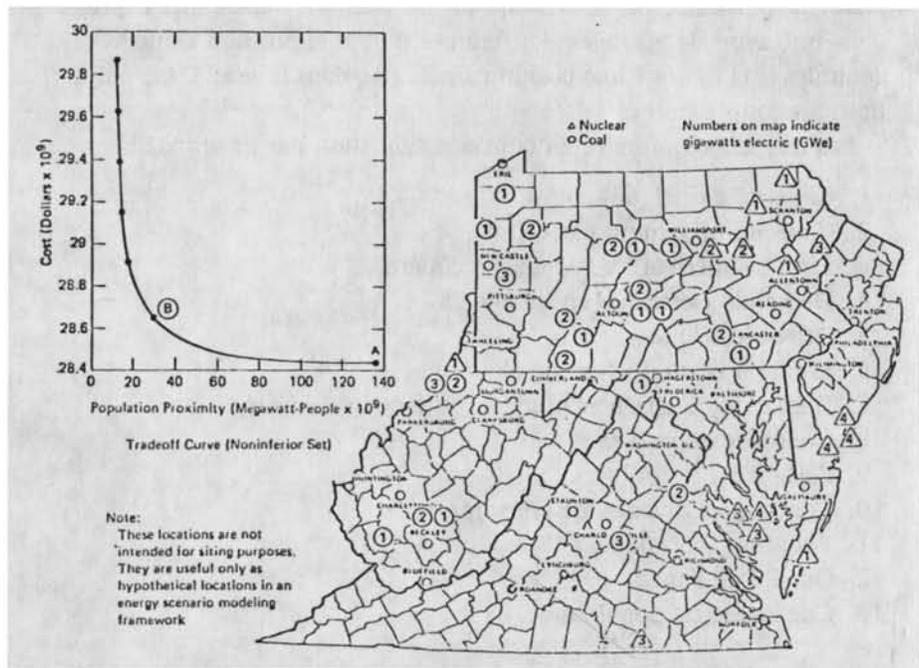


FIG. 7. – Position des centrales pour un coût externe réduit (point B) [6]

Les objectifs sont, par exemple :

1. Minimiser les coûts de transmission de l'électricité.
2. Minimiser les coûts de transport du charbon.
3. Minimiser l'impact sur la population : puissance \times population.

Un programme d'allocation optimale à objectifs multiples permet d'obtenir pour chaque carte un point sur les figures 6 et 7 à droite de la courbe de Pareto, lieu des points pour lesquels tout accroissement du coût interne provoque une diminution du coût externe et vice versa. Le point A correspond au minimum du coût interne. Le point B est une solution alternative où une réduction de près de 80 % du coût externe ne provoque qu'une augmentation de l'ordre de 1 % pour le prix du kWh. Cet exemple montre qu'une étude d'impact est susceptible de conduire à des améliorations substantielles. Pour tempérer cet optimisme, il faut toutefois mentionner que la Belgique offre moins de degrés de liberté en ce qui concerne les sites potentiels.

– *Le chauffage urbain*

Les études récentes concernant le chauffage urbain en Belgique montrent que la rentabilité économique est – au mieux – marginale. Toutefois, la considération des coûts externes est susceptible de changer cette situation. En effet, le fait de passer du chauffage domestique individuel (avec émission de SO₂ à basse altitude) au chauffage urbain (avec émission de SO₂ à plus haute altitude) disperse la même quantité de polluants sur une plus grande surface, moins peuplée en moyenne, ce qui entraîne une diminution concomitante du coût sanitaire. La figure donne l'exemple du double effet d'une réduction des émissions de SO₂ due à la désulfuration et d'une dispersion accrue due au chauffage urbain, pour un district industriel de la RDA [7].

Quel est l'avenir des études d'impact énergétique en Belgique ?

On parle beaucoup ces derniers temps des études d'impact, notamment celles qui concernent l'énergie. Le gouvernement belge va proposer incessamment de nouvelles règles en la matière et les études scientifiques qui en découleront constitueront sans aucun doute un champ d'action privilégié pour les universités. Un groupe d'étude (*) s'est

(*) (MM. ANNAERT, DEVOOGHT, SAROT, WOLLAST).

d'ailleurs constitué au sein de l'U.L.B. en vue d'étudier la méthodologie des études d'impact énergétique.

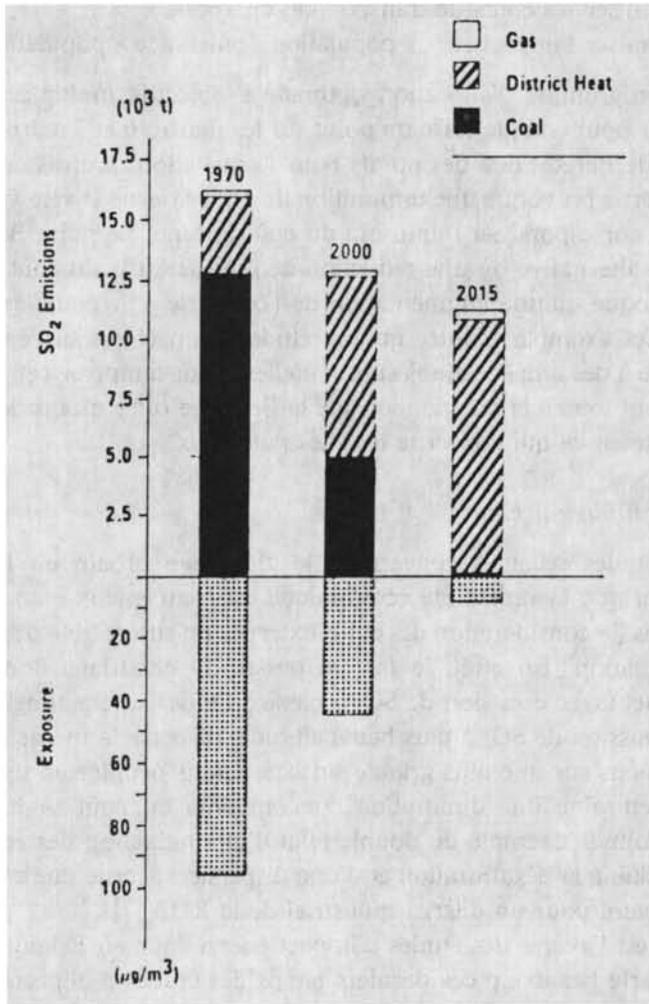


FIG. 8.

Il faut remarquer que la situation qui prévaut actuellement en Belgique est loin d'être satisfaisante. Le rapport de sûreté qui constitue le document de base en ce qui concerne le permis d'exploiter une centrale nucléaire – pour me borner à un seul exemple – n'a que de lointains rapports avec une étude d'impact.

On se borne d'ailleurs à vérifier que les normes de rejets à la frontière du site sont respectées et nullement à évaluer l'ensemble des coûts sociaux pondérés par la probabilité des défaillances et cela d'une manière spécifique pour chaque site. Ce qui est plus grave, c'est que la doctrine actuelle de la Commission Spéciale, responsable de ce problème, fait de l'exploitant le seul propriétaire des renseignements concernant l'impact subi par nos concitoyens. Ceux-ci n'ont aucun moyen de s'informer à la source et aucun scientifique n'est en mesure de ce fait de procéder à une quelconque contreexpertise. Notre pays qui donne si volontiers des leçons en matière d'études d'impact à ses voisins ferait bien de tourner ses yeux vers la démocratie américaine où la totalité des documents techniques est accessible au public et a fortiori à ceux capables de procéder à une évaluation scientifique objective.

5. LA PERCEPTION DU RISQUE

Comme il est abondamment clair depuis quelques temps, la perception du risque et la réalité du risque sont deux choses qui ne sont pas toujours identiques, et cela même et surtout en dehors du domaine énergétique. Il est primordial de comprendre les raisons d'une fausse perception et bien que je ne désire absolument pas m'avancer sur un terrain qui n'est pas de ma compétence et qui fera d'ailleurs l'objet d'un cours de la licence, je livre ici quelques remarques personnelles.

Jusqu'à présent, nous avons interprété le terme risque dans le sens d'un dommage potentiel. Ce dommage est plus ou moins probable et nous pouvons donc lui associer un certain degré d'incertitude. Notre attitude à l'égard de ce dommage est conditionnée à la fois par l'ampleur de ce dommage et par sa probabilité. Mais cette attitude est aussi liée au fait que nous avons non seulement une aversion à l'égard du dommage mais aussi à l'égard de l'incertitude elle-même. Cette aversion au risque concerne évidemment une autre signification de ce terme qui est pris alors en tant que synonyme d'incertitude.

Supposons que nous associons au risque une «utilité» qui sera négative. Cette désutilité croît évidemment avec l'ampleur du risque. Si nous identifions la désutilité d'un décès accidentel avec le coût de la vie humaine, la relation entre le nombre de décès et la désutilité sera linéaire. Toutefois, nous avons tendance à considérer que la désutilité d'un accident faisant 100 morts est plus que 100 fois plus grande que celle d'un accident faisant 1 mort. Il en résulte que la fonction d'utilité

qui apparaît à la figure 9 est concave. Imaginons maintenant que nous soyons en présence d'une technologie qui a une certaine probabilité de provoquer un accident associé au point A, et une probabilité complémentaire de ne provoquer aucun accident (point O). La désutilité moyenne et le nombre moyen de décès sont associés au point B sur la droite qui joint O à A. Plus la probabilité d'un accident est élevée, plus le point B se rapproche du point A. Considérons maintenant une technologie qui ne présente aucune incertitude en ce qui concerne les dommages, ceux-ci étant réguliers et constants. La même désutilité que dans le cas précédent correspond cette fois au point B', donc un nombre de décès plus élevé appelé *équivalent certain*. L'excès de décès consenti pour passer d'une technologie incertaine (en ce sens que le dommage est aléatoire) à une technologie certaine (où le dommage est connu) en maintenant la même désutilité est la *prime* consentie par le décideur pour éviter l'incertitude.

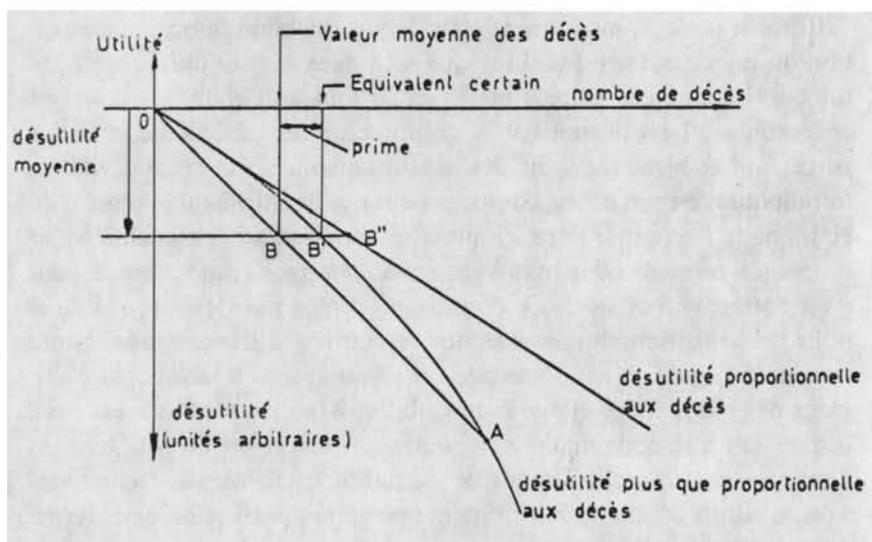


FIG. 9.

Cette prime est positive compte tenu de son aversion au risque traduit par la concavité de la courbe d'utilité. Si la prime que le décideur est prêt à consentir est supérieure à BB' , il choisira une technologie plus dangereuse *en moyenne*, dans le seul but d'écartier la possibilité d'un accident grave (point A) quoique improbable.

Nous avons là une amorce d'explication de comportements «irrationnels». Cet exemple montre que même si un décideur perçoit correctement le risque, il peut, dans certaines conditions, choisir rationnellement l'option dont le risque moyen est le plus élevé. Ce choix découle d'une fonction d'utilité qui incorpore l'ensemble des jugements de valeur du décideur à l'égard du risque, que ces jugements soient rationnels ou non d'ailleurs.

Plusieurs expériences sur la perception du risque ont été réalisées récemment et une des plus connues est celle de Slovic *et al.* [8]. On demande simplement de classer 30 activités par risque décroissant, le risque étant caractérisé par un nombre moyen de décès sur l'ensemble de la population. Il est clair que le risque ainsi défini fait intervenir le danger intrinsèque d'une activité et le nombre de participants. Une corrélation de rang permet de confronter la réalité et la perception. L'expérience a été refaite avec les étudiants de la Licence en journalisme et de la Licence en environnement.

Dans l'ensemble les erreurs de perception (figure 10) reflètent bien l'influence des media.

Plus dangereux que la réalité		Moins dangereux que la réalité		Aussi dangereux que la réalité
"Ecologie"	"Stéréotypes" négatifs	"Société de consommation"	"Stéréotypes" positifs	
Energie nucléaire Pesticides Aérosol Contraceptifs Additifs Colorants Antibiotiques	Armes à feu Police Incendie Aviation commerciale	Automobile Cigarette Boissons alcooliques Aviation de tourisme Chasse Bicyclette Natation Rugby Tondeuse Electroménager	Chirurgie Construction Energie électrique Rayons X Chemins de fer Vaccinations	Motocyclette Alpinisme Ski

FIG. 10.

6. CONCLUSIONS

1. La méthodologie du risque existe et se développe rapidement. L'évaluation du risque et d'une manière générale son intégration dans une

étude d'impact doit être faite avec toutes les nuances nécessaires, tenant compte des caractéristiques locales, de la technologie utilisée et en se gardant d'attitudes simplificatrices ou réductionnistes qui consistent à dire que telle énergie est autant de fois plus ou moins dangereuse que telle autre, partout et en toutes circonstances.

2. Si les pouvoirs publics consacrent un peu moins de crédits et d'attention à la sûreté qu'il n'est souhaitable, en revanche une attention disproportionnée est portée actuellement par le public aux risques énergétiques. Ceux-ci sont beaucoup plus faibles en général que les autres risques industriels, eux-mêmes nettement moins importants que les risques de la vie quotidienne tel que la voiture, l'alcool et le tabac.

Le problème majeur aujourd'hui n'est pas de diminuer les risques sanitaires de la production d'énergie mais de diminuer les risques infiniment plus graves d'une pénurie éventuelle d'énergie.

REFERENCES

- [1] Reactor Safety Study, USNRC-WASH-1400 (1975).
- [2] R. WILSON, W. J. JONES, *Energy, Ecology and the Environment*, Academic Press 1974.
- [3] Decision analysis of energy alternatives : a comprehensive framework for decision-making, S. M. BARRAGER *et al.*, in "Energy and the environment cost-benefit analysis", edited by R. KARAM, K. Z. MORGAN, Pergamon Press (1976).
- [4] T. W. T. BURNETT, *Transactions of the American Nuclear Society* **23**, 453 (1976).
- [5] Human disease from radon exposures : the impact of energy conservation in buildings, BUDNITZ R. J. *et al.*, LBL 7809, Aug. 1978.
- [6] Multiobjective regional energy location model : cost versus population proximity tradeoffs, T. EAGLES, T. MARGUIES, J. COHON, C. REVELLE, Johns Hopkins University. Annual meeting A.N.S. San Francisco, October 1979.
- [7] R. L. DENNIS : "The smeared concentration approximation method : a simplified air pollution dispersion methodology for regional analysis", International Institute for Applied Systems Analysis, RR-78-9, July 1978.
- [8] P. SLOVIC *et al.*, *Environment*, April 1979.

la politique énergétique dans le contexte économique actuel

INTRODUCTION

On ne peut pas dire qu'il y ait actuellement cohérence d'attitudes et de comportement vis-à-vis de la politique énergétique chez les agents économiques, qu'il s'agisse des particuliers, des entreprises ou de l'Etat. Il semble d'une part que la nécessité d'une telle politique comportant notamment un volet de politique d'utilisation rationnelle de l'énergie (URE) soit largement reconnue, mais les réalisations dans ce domaine sont encore trop limitées ; on attend toujours le grand débat public promis depuis des années, qui ressemble de plus en plus à l'Arlésienne de Bizet : on en parle toujours mais on ne le voit jamais. D'autre part, certains croient que la mise en application d'une politique d'URE suffira à elle seule à assurer le redressement de l'économie belge, et il n'est pas certain que cet espoir ne soit pas exagéré.

Etant donné ces espoirs et ces incohérences, un essai d'analyse à la fois théorique et empirique des avantages et des limites d'une politique énergétique et plus particulièrement d'une politique d'URE n'est pas superflu.

Dans une première section, nous analyserons la nécessité d'une politique énergétique en termes de théorie de la politique économique ; la deuxième section sera consacrée à des études empiriques des liens entre l'énergie et la croissance ; dans la troisième section, nous essaierons de montrer le pourquoi des faibles réalisations en matière d'URE ; enfin, dans la quatrième section, nous aborderons le problème de la subsidiation des investissements économisant l'énergie, en montrant que celle-ci pourrait être permise, dans le cas de l'isolation des bâtiments, par les retombées macro-économiques des investissements.

1. LA POLITIQUE ÉNERGÉTIQUE, COMPOSANTE NÉCESSAIRE DE LA POLITIQUE ÉCONOMIQUE

Tinbergen [13] pose le problème de la politique économique en termes d'objectifs, d'instruments, de contraintes sur les instruments et d'environnement extérieur ; la tâche du responsable de la politique économique est d'autant plus malaisée que le nombre d'objectifs est élevé par rapport au nombre d'instruments, que les contraintes sur les instruments sont serrées, que l'environnement extérieur est défavorable et que les conflits entre objectifs sont fréquents.

Si on compare la situation actuelle à celle précédant la crise pétrolière, on constate une augmentation du nombre des objectifs, une diminution du nombre des instruments, un resserrement des contraintes et une détérioration de l'environnement extérieur.

En effet, avant la crise pétrolière, les objectifs les plus souvent cités étaient ceux du «carré magique» (plein emploi, croissance, stabilité des prix et équilibre de la balance des paiements). La situation économique actuelle est telle que sont venus s'y ajouter de nouveaux objectifs tels l'équilibre des finances publiques, la «défense» du franc et la limitation des importations d'énergie qui prennent parfois le pas sur les objectifs du carré magique (il n'est pas certain par exemple que la politique de croissance zéro des dépenses publiques n'ait pas de conséquence dommageable sur l'emploi). Inversement, des instruments habituellement utilisés (voir par exemple [10]) auparavant ont disparu, comme le solde budgétaire ou le taux de change. D'autre part, certains considèrent que des instruments ont atteint leurs limites : il n'existe sans doute pas de plafond économique objectif aux taux d'imposition (excepté le taux de 100 %), mais la pression fiscale et parafiscale est présentée et ressentie comme étant de plus en plus insupportable. Enfin, la croissance plus faible de nos clients habituels (plus de 70 % des exportations de l'UEBL se font vers les pays du Marché Commun) et la concurrence de plus en plus vive des pays en voie de développement et nouvellement industrialisés sur des marchés de produits traditionnellement fabriqués en Belgique ne contribuent pas à faciliter la solution de nos problèmes. En conséquence, les possibilités de conflit entre objectifs sont accrues ; les exemples ne manquent pas : nous avons fait allusion plus haut au conflit possible entre l'équilibre des finances publiques et le plein emploi ; la «défense» du franc entre également en conflit avec la

croissance et le plein emploi en nécessitant le maintien des taux d'intérêts élevés.

L'utilisation d'instruments de politique économique nouveaux devient donc de plus en plus nécessaire : il serait trop dangereux d'attendre un redémarrage des locomotives allemande et américaine, et il apparaît de plus en plus clairement que l'arsenal des instruments classiques est insuffisant. Une partie de ces instruments doit certainement être trouvée dans le domaine de l'énergie qui conditionne aujourd'hui l'évolution économique, l'explosion et le maintien aux niveaux atteints de ses prix étant une des causes des déséquilibres constatés en Belgique et du ralentissement de la croissance. Les possibilités dans ce domaine sont nombreuses et encore en grand partie inexplorées.

2. ANALYSE EMPIRIQUE DES RESPONSABILITÉS DE L'ÉNERGIE ET DE L'IMPACT D'UNE POLITIQUE D'URE

S'il y a consensus général pour déclarer que l'énergie est partiellement responsable des difficultés de l'économie belge et si, du point de vue de la théorie de la politique économique, il apparaît qu'une politique énergétique et plus particulièrement une politique d'URE est nécessaire, il est souhaitable de conforter ce consensus et cette analyse théorique par une analyse empirique ; l'expérimentation n'étant pas possible en économie, cette analyse empirique doit prendre la forme d'un exercice de modélisation.

Dans le cadre du programme national R-D en matière de l'énergie, le Dulbea, en collaboration avec d'autres centres de recherche, dont le Core et le Bureau du Plan, a exploré la décennie 1980-1990 à l'aide de plusieurs scénarios, permettant de mettre en évidence notamment l'impact de variations de prix de l'énergie sur notre économie ainsi que l'apport possible d'une politique d'URE. Les résultats de ces travaux ont été présentés à Bruges en novembre 1980 (*).

Les modèles utilisés dans cette étude étaient un modèle d'offre d'énergie du Core, un modèle central de détermination des productions et des consommations et des modèles économétriques de demande de

(*) Services de programmation de la politique scientifique, Journées d'étude, Bruges, 17-18 novembre 1980 : «La demande et l'offre d'énergie en Belgique : évolution récente et perspectives dégagées par la recherche économique».

consommation privée du Dulbea et des modèles de demande intermédiaire d'énergie du Bureau du Plan.

La description complète de ces modèles peut être trouvée dans [4], [5] et [2]. Nous nous contenterons de donner ici les indications strictement nécessaires à la compréhension du rôle qu'ils ont joué dans l'étude et d'en illustrer l'articulation par la figure 1.

Le modèle d'offre du Core optimise, en fonction de la demande d'énergie finale et de la production de quelques secteurs gros consommateurs d'énergie, les investissements et l'exploitation de différentes technologies de production, de transformation et d'utilisation d'énergie dans l'ensemble des secteurs concernés. Il détermine notamment les importations d'énergie et la part des différents combustibles dans la production de l'électricité.

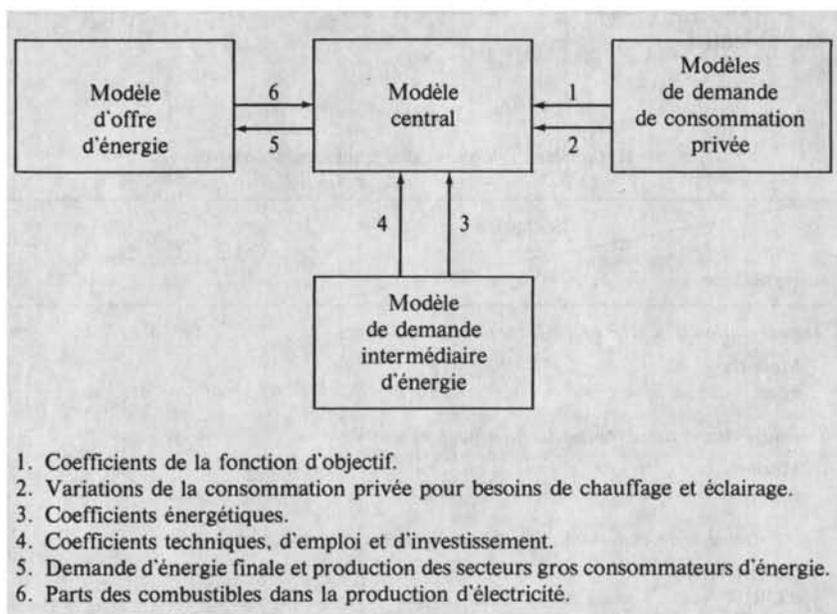
Le modèle central du Dulbea décrit les principales interactions entre le système énergétique et l'économie dans son ensemble. C'est un modèle d'optimisation à long terme déterminant l'évolution optimale du système économique, en fonction des priorités de la nation. Il est multi-sectoriel (24 branches d'activité) et dynamique. La fonction d'objectif est la satisfaction des consommateurs représentée par une fonction d'utilité dont les paramètres sont calculés à partir de fonctions de demande estimées. Une des principales contraintes du modèle impose aux importations nettes de biens et services de ne pas dépasser un montant donné ; elle assure que l'objectif équilibre de la balance des paiements n'est pas détérioré, du moins en ce qui concerne les biens et services.

Les modèles de consommation privée du Dulbea déterminent les demandes des postes de consommation en fonction des prix relatifs et de la consommation totale, les consommateurs étant supposés maximiser leur satisfaction.

Enfin, les modèles sectoriels de demande intermédiaire d'énergie du Bureau du Plan sont établis pour les principaux secteurs industriels et font l'hypothèse d'une minimisation des coûts afférents à la production dans le cadre de possibilités technologiques décrites par une fonction de coût. Ils fonctionnent à deux niveaux ; au premier, la demande d'énergie est répartie entre les différents produits énergétiques, en fonction de leurs prix et au second, la demande de chaque facteur de production (capital, travail, énergie, autres inputs intermédiaires) est déterminée en fonction du niveau de la production et du prix de tous les facteurs. Les modèles du premier niveau sont appelés interénergétiques et ceux du second, KLEM.

Les modèles de demande sont parfois remplacés par des études à caractère plus technique pour fournir des exogènes au modèle central.

FIG. 1. – Articulation des modèles.



La description complète des scénarios serait tout aussi fastidieuse pour le lecteur ; elle est donnée dans [6] et [7]. Signalons cependant qu'ils se différencient par des hypothèses relatives à l'évolution des prix réels des énergies importées, aux comportements de consommations d'énergie par les agents économiques et au développement plus ou moins rapide des exportations. En ce qui concerne la consommation d'énergie par les secteurs, les développements de la modélisation n'étaient malheureusement pas suffisants, dans le cas des transports et du secteur tertiaire, pour envisager des comportements différents. Pour les secteurs industriels par contre, trois types de comportement ont été retenus : un comportement de « marché », la demande d'énergie et des autres facteurs de production étant déterminée par les prix relatifs, un comportement d'« URE » qui tient compte des possibilités technico-économiques d'économie d'énergie et un comportement semblable à celui des années 1977-1978. Plusieurs possibilités existent également dans le secteur domestique : ou bien la consommation d'énergie a été estimée sur base de données techniques en supposant des économies

d'énergie (par rapport à la situation actuelle) nulles, modérées ou fortes, ou bien elle a été déterminée en fonction du budget de consommation des ménages et des prix relatifs.

Les caractéristiques des scénarios les plus représentatifs sont données au tableau 1.

TABLEAU 1

Hypothèses retenues pour quelques scénarios						
Hypothèses	Scénarios					
	A	B	C	D	E	F
<i>Augmentation des prix réels des énergies importées</i>						
Modérée	×		×	×	×	×
Forte		×				
<i>Développement des exportations de biens et services</i>						
Modéré	×	×		×		×
Rapide			×		×	
<i>Comportement de consommation d'énergie des secteurs industriels</i>						
De «marché» d'URE Passé (années 1977-1978)	×	×	×	×	×	×
<i>Comportement de consommation du secteur domestique</i>						
Economies modérées	×					
Economies fortes		×		×	×	
Pas d'économie (dans les logements existants)						×
Fonction du budget et des prix			×			

La définition des scénarios est telle qu'une série de mesures d'impacts peuvent être réalisées par comparaison des résultats. C'est ainsi que les écarts entre les scénarios A et B, qui diffèrent principalement par les prix réels des énergies importées, permettent de chiffrer l'impact d'une augmentation de ces prix sur l'activité économique générale et sur la demande d'énergie. Les comparaisons des résultats du scénario D avec les scénarios A et F donnent les effets d'une politique d'URE, la référence étant soit une situation où des économies sont déjà engendrées par le système des prix (A), soit une situation où le comportement de consommation est un comportement du passé (F).

Trois conclusions au moins peuvent être tirées de l'analyse des résultats de scénarios, le tableau 2 donnant, à ces égards, les chiffres les plus significatifs :

- L'augmentation des prix réels des énergies importées a un impact négatif non négligeable sur l'activité économique ;
- Une politique d'URE ne stimule que faiblement l'activité économique (mesurée en termes de PIB) ; une relance de celle-ci suppose d'autres mesures et par exemple un développement des exportations ;
- Une politique d'URE est nécessaire en cas de croissance rapide, pour éviter des goulots d'étranglement dus à une consommation trop forte d'énergie.

Il faut, pour comprendre les résultats, ne pas oublier que tous les scénarios sont simulés dans l'hypothèse d'une non détérioration de l'objectif d'équilibre de la balance des paiements, c'est-à-dire d'une constance des importations nettes de biens et services (à l'exception des scénarios C et E, où elles sont diminuées).

2.1. Les prix de l'énergie, responsables du ralentissement de la croissance

L'impact d'une augmentation des prix des énergies importées peut se mesurer, comme nous l'avons dit plus haut, par la comparaison des résultats des scénarios A et B. Cette augmentation, bien que peu importante comparée à certains sauts constatés dans le passé (elle est comprise entre 3% par an pour le pétrole et 1% par an pour le charbon, alors que de 1978 à 1980 le prix du pétrole a plus que doublé) introduit à l'horizon 1990 des diminutions du produit intérieur brut de 2,5%, de la consommation privée de 5,9% et de l'emploi de 76.000 unités.

En période de croissance rapide, les variations du produit intérieur brut et de la consommation privée pouvaient paraître faibles, mais la croissance générée dans le scénario A étant déjà très lente (de l'ordre de 2% pour le produit intérieur brut et de 1% pour la consommation privée), ils sont relativement assez importants : ils correspondent à une amputation de 10% de la croissance du produit intérieur brut et de plus du tiers de celle de la consommation privée.

Quoiqu'il en soit, ces résultats confirment que les prix élevés de l'énergie sont une des causes de la médiocrité de la situation économi-

que, actuelle et prévisible, par suite du poids que les importations d'énergie font peser sur la balance des paiements (les augmentations de prix entre les scénarios A et B gonflent, par exemple, la valeur des importations nettes d'énergie de plus de 100 milliards de francs en 1990).

2.2. Impact faible d'une politique d'URE sur l'activité économique générale et nécessité de politiques complémentaires

La notion d'économie d'énergie, essentielle quand on parle de politique d'URE, est ambiguë ; en effet, les mécanismes du marché induisent, déjà quand les prix réels de l'énergie augmentent, des diminutions de consommation et donc des économies d'énergie qui sont, par exemple, prises en compte dans le scénario A. Pour éviter cette interférence des mécanismes du marché, les économies d'énergie sont définies comme étant la différence, à activités des secteurs consommateurs égales, entre la consommation correspondant au comportement des années 1977-1978 et la consommation diminuée par suite de la mise en place d'investissements économisant l'énergie.

Des études détaillées des secteurs industriels et domestiques ont montré que des économies d'énergie finale de l'ordre de 6,8 Mtep étaient possibles à l'horizon 1990 ; pour les autres secteurs, une estimation plus grossière laisse supposer que 2,3 Mtep d'économie supplémentaire sont réalisables.

Le montant d'économie ainsi prévu est inférieur aux chiffres de l'OPI [12] qui considèrerait un objectif de 10 Mtep pour l'industrie uniquement à l'horizon 1990. Mais les travaux de l'OPI datent de 1977, et les dégradations de la situation économique et financière intervenues depuis justifient la prudence relative des estimations retenues ;

Les premiers 6,8 Mtep et les investissements correspondants, valant 171 milliards de francs de 1980 pour l'ensemble de la période, ont été modélisés dans l'étude.

L'analyse de l'impact de ces mesures est assez délicate pour deux raisons ; la première est que les économies dues à la politique d'URE sont mesurées par rapport à une situation qui n'a plus aucune chance de se réaliser et qui correspond au scénario F, tandis que l'évolution la plus probable sans mesure spécifique d'économie est celle du scénario A, qui sert de scénario réaliste de référence ; la deuxième est que les économies hors des secteurs industriels et domestiques ne sont pas

modélisées ; les résultats de la modélisation sous-estiment donc l'impact de la politique d'URE retenue.

Néanmoins, il apparaît qu'une politique d'URE ne peut pas, à elle seule, assurer la relance espérée de l'économie. En faisant l'hypothèse que l'impact des économies dans les secteurs non modélisés est semblable à celui des économies dans les secteurs modélisés, on constate que les différences à l'horizon 1990 entre les scénarios D (prenant en compte une politique d'URE) et F (supposant un comportement du passé) sont inférieures à 2% et 5% respectivement au niveau du produit intérieur brut et de la consommation privée ; les mêmes différences entre le scénario D et le scénario A (comportement de marché) sont de l'ordre de 1% et 2,5%. L'impact sur le chômage est plus significatif, en valant au moins 50.000 unités. Mais le but d'une politique d'URE est évidemment, en premier lieu, de diminuer la consommation d'énergie et de soulager la balance des paiements ; ce but est atteint, car en 1990 la diminution de la consommation apparente brute d'énergie primaire varie entre 6 et 10 Mtep environ selon qu'on se réfère au scénario A ou F tandis que le gain au niveau de la valeur des importations nettes d'énergie peut être estimé à 70 milliards de francs dans le premier cas et à 130 milliards dans le second. Une politique d'URE joue donc pleinement son rôle dans le domaine de l'énergie, mais ses retombées macro-économiques restent limitées ; il faut cependant remarquer qu'une série d'apports induits possibles et espérés n'ont pas été pris en compte, et par exemple le rôle de catalyseur pour nos exportations que pourrait jouer le développement d'une production nationale de biens d'investissement économisant l'énergie.

Le rétablissement d'une croissance plus rapide nécessite d'autres mesures et/ou l'amélioration de l'environnement extérieur. C'est dans cette optique que le scénario C a été simulé. Il est en effet admis par la plupart des observateurs qu'une des conditions nécessaires au redressement de l'économie réside dans un développement accéléré des exportations ; le scénario C suppose que les exportations sont, en 1990, supérieures de 25% à celles du scénario A. A l'inverse des chiffres macro-économiques cités précédemment, ce dernier peut sembler énorme et même utopique ; en réalité, il ne représente qu'une augmentation du taux de croissance des exportations faisant passer celui-ci de 5 à 7% par an, ce taux de 7% ayant souvent été dépassé en Belgique, même dans les années 70. Des importations supplémentaires sont ainsi permises et les répercussions sur le produit intérieur brut et la consommation

privée sont telles que la croissance de cette dernière, par exemple, est plus que doublée. Il ne fait donc pas de doute, et un modèle n'était pas nécessaire pour le montrer, qu'un développement accéléré des exportations serait favorable à l'économie belge. Cependant, une relance de ce type ne présente pas que des avantages ; en effet, par suite du développement de la production et de la consommation, la demande totale d'énergie finale dépasse, en 1990, de 18 % celle du scénario A, la différence étant plus importante pour des produits pétroliers comme l'essence. Ce résultat doit être souligné. En effet, la relance ne se produira pas uniquement en Belgique et la demande d'énergie augmentera également plus vite dans les autres pays, ce qui risque d'accélérer l'apparition de nouvelles tensions purement économiques sur le marché de l'énergie.

2.3. La politique d'URE, nécessaire dans l'hypothèse d'une croissance soutenue

L'analyse du scénario C (de relance des exportations) fait apparaître, à côté de nombreux aspects positifs, un risque de goulot d'étranglement dû à une consommation trop forte d'énergie et plus particulièrement de produits pétroliers. Des mesures tendant à diminuer la consommation de l'énergie, souhaitables dans un contexte de croissance faible, le sont encore plus lorsque la croissance est plus soutenue.

C'est dans cette optique que le scénario E, qui suppose à la fois une relance par la demande extérieure et une politique d'URE, a été simulé. Les résultats de cette politique combinée sont très semblables, du point de vue macro-économique, à ceux de la politique isolée de relance par la demande extérieure, mais la consommation d'énergie finale est fortement diminuée : elle est en effet inférieure de 5,6 Mtep à celle du scénario C, tout en étant supérieure de 1,7 Mtep à celle du scénario A, les niveaux de production des branches d'activité étant beaucoup plus élevés.

Ces résultats prouvent qu'une politique d'URE, même si elle ne contribue que faiblement (en comparaison avec d'autres politiques) à la relance de l'économie, constitue une composante indispensable d'un nouveau type de croissance ; elle présente de plus l'avantage de pouvoir être décidée au plan national, indépendamment de l'environnement extérieur.

TABLEAU 2

Principaux résultats des scénarios

	A	B	C	D	E	F
Taux de croissance du volume du produit intérieur brut (1977-1990) % par an	2.2	2.0	3.4	2.2	3.5	2.1
Taux de croissance du volume de la consommation privée (1977-1990) % par an	1.3	0.9	3.0	1.5	3.2	1.2
Chômage en 1990 (milliers)	700	776	155	665	111	715
Importations nettes d'énergie en 1990 (milliards de francs courants)	593.4	705.6	746.8	554.1	632.6	652.4
Consommation d'énergie finale en 1990 (Mtep)	40,52	37,52	47,80	37,36	42,17	43,58
Consommation apparente brute d'énergie primaire en 1990 (Mtep)	52,80	49,08	63,40	49,53	55,81	56,76

3. RAISON DU FAIBLE DÉVELOPPEMENT DE LA POLITIQUE D'URE

L'examen de l'évolution récente, tant de la consommation d'énergie finale que de la consommation apparente brute d'énergie primaire, ne manque pas de susciter l'étonnement et de faire douter de la clairvoyance des agents économiques. La consommation d'énergie, après avoir diminué de 1973 à 1975, avait augmenté en 1976 dans des proportions compatibles avec l'évolution de l'activité économique, puis semblait s'être stabilisée en 1977. Ce comportement de 1973 à 1977 est logique et peut s'expliquer en fonction de la croissance économique et du choc pétrolier de 1973-1974. L'évolution des deux dernières années connues statistiquement est moins compréhensible ; en effet, la consommation de 1979 est supérieure de plus de 11 % à celle de 1977, ce qui implique une élasticité supérieure à 2 par rapport au produit intérieur brut ; même si ce paramètre est un peu grossier, en faisant jouer le même rôle à des modifications de structure de la production et à des variations de la consommation spécifique d'énergie, une valeur aussi

élevée est significative d'un certain comportement. La croissance de ces dernières années ne semble donc pas correspondre au nouveau type de croissance évoqué plus haut, et impliquant, contrairement à celui de la fin des années 60 et du début des années 70, une diminution du rapport entre la consommation d'énergie et la production. Comment peut-on expliquer ce phénomène, ou, en d'autres termes, la mise en place insuffisante de mesures d'URE ?

Une grande partie de l'explication réside dans l'évolution des prix des énergies depuis 1975 et dans les anticipations qui en résultent des agents économiques.

L'excès potentiel d'offre sur le marché du pétrole, dû en grande partie à la crise économique, et la dérive du dollar par rapport au franc belge ont eu pour conséquence que de 1975 à 1978 les taux de croissance des prix de la plupart des énergies ont été inférieurs aux taux général d'inflation ; quelques exemples peuvent illustrer ce fait : de fin 1975 à fin 1978, les prix de vente aux consommateurs des produits pétroliers ont augmenté, si on considère les plus importants, de 1,1 % pour le gas-oil de chauffage à 15 % pour l'essence normale ; entre 1975 et 1978, le déflateur des dépenses de consommation privée pour besoins de chauffage et d'éclairage a augmenté de 9,8 % ; entre 1975 et 1978 toujours, le prix de l'électricité, haute ou basse tension, a crû de moins de 7 % ; à titre de comparaison, la hausse du déflateur de la consommation privée, entre 1975 et 1978, était de 20,8 %. Le prix réel de l'énergie a donc diminué jusqu'en 1978, cette tendance à la baisse étant évidemment arrêtée depuis 1979.

De plus, les prix des produits énergétiques les plus connus en Belgique sont les prix de vente au consommateur des produits pétroliers, calculés en fonction du contrat programme ; or, si on analyse l'évolution du prix du produit le plus important, le gas-oil de chauffage, on constate que, de 1976 à 1978, ce prix a varié 36 fois, dont 18 à la baisse (pour la seule année 1979, les chiffres correspondants sont 30 et 10).

La conjonction d'une diminution du prix réel de l'énergie, après le premier choc pétrolier, et de fluctuations nombreuses et en sens divers des prix affichés a amené les consommateurs jusqu'en 1978 certainement et sans doute jusqu'en 1979, à ne pas anticiper une hausse durable des prix de l'énergie ; la rentabilité espérée d'investissements économisant l'énergie étant d'autant plus grande que les hausses de prix antici-

pées sont fortes, les agents économiques ont fort probablement sous-estimé cette rentabilité et renoncé en conséquence aux investissements.

Mais les anticipations de prix ne sont pas seules en cause ; le contexte politico-économique n'a pas été et n'est pas spécialement favorable à la mise en route d'une politique d'URE. La priorité accordée par les gouvernements aux problèmes de régionalisation, à la défense du franc, à un essai d'équilibrage des finances publiques et au soutien des secteurs en difficulté a relégué à l'arrière plan les préoccupations relatives à l'énergie. D'autre part, les difficultés dans lesquelles se débattent nombre d'entreprises leur permettent difficilement d'envisager la réalisation d'investissements économisant l'énergie, d'autant plus que les capitaux sont rares et chers et qu'un choix doit souvent être fait entre un investissement de ce type et d'autres investissements, qu'ils soient de rationalisation ou d'expansion.

Un troisième élément intervient, qui n'est pas sans rapport avec le précédent. Il est possible que les entreprises, comme les particuliers, attendent pour prendre leurs mesures d'économie que des incitants financiers, dont l'éventualité est assez régulièrement envisagée, soient mis en place pour le gouvernement. Or ces incitants constitueront normalement une des composantes de la politique énergétique qui doit encore être discutée et leur problématique est assez complexe étant donné notamment la diversité des mesures possibles : faut-il accorder une aide pour n'importe quelle mesure d'économie, quels doivent être les critères de sélection, quels seront le niveau et les modalités de l'aide, quelles seront les retombées sur l'économie en général et sur les finances publiques en particulier, ... ?

Une étude de modélisation macro-économique, présentée en section 4, tente de fournir des éléments de réponse à certaines de ces questions.

4. RETOMBÉES MACRO-ÉCONOMIQUES DE MESURES D'ÉCONOMIE D'ÉNERGIE DANS LES BÂTIMENTS ET TAUX DE SUBSIDIATION POSSIBLE PAR L'ÉTAT

Les agents économiques privés ne prennent en compte, dans leur calcul de rentabilité des investissements destinés à économiser l'énergie, que des effets directs de ceux-ci ; les effets indirects sur l'emploi, la balance des paiements, les finances publiques sont des éléments qui n'intéressent en réalité que l'état et qui pourraient justifier une subside-tion au moins partielle, des investissements.

La quantification des retombées macro-économiques des mesures d'économie d'énergie n'est pas chose simple ; elle nécessite l'utilisation

combinée de modèles macro-économiques et de données micro-économiques ou à la rigueur sectorielles qui ne sont pas toujours disponibles. Elle a cependant pu être tentée, par suite de l'existence d'études préalables, dans le cas du bâtiment [8].

Le matériel de base était constitué par les travaux de l'OPI [11] actualisés et complétés par une étude de A. Hoste [9] sur les mesures d'isolation dans le bâtiment.

Dans une première étape, chaque mesure d'isolation est traduite en termes de demande finale adressée aux différents secteurs de l'économie, par une demande à l'importation et par la mise au travail d'un certain nombre de personnes pour le placement. Etant donné cette demande finale, les niveaux de production sectoriels sont calculés à l'aide du modèle input-output dont l'utilisation est classique en économie [3] ; la matrice input-output utilisée est une matrice prévisionnelle pour 1980 [5] complétée de manière à inclure, en plus des cinquante branches de l'input-output belge, quatre activités de production de matériel isolant et une activité de placement. L'emploi et les importations nécessaires sont enfin déterminés en fonction des productions sectorielles en faisant l'hypothèse, assez favorable, d'une absence d'inertie dans les procédés de production et donc d'une création instantanée d'emploi. En conséquence, les mesures, déjà caractérisées par un rapport économie d'énergie par million investi, le sont en plus par des rapports emploi induit et importations induites par million investi ; ces trois rapports diffèrent évidemment très fort de mesure à mesure ; ils diffèrent également des rapports correspondant à un investissement «moyen» n'économisant pas l'énergie.

Dans la deuxième étape, les retombées macro-économiques dans l'année sont calculées en combinant de façon appropriée les résultats de la première étape et des éléments de la forme réduite (*) du modèle macro-économique Breughel [1] utilisé au Dulbea pour étudier l'évolution de l'activité économique à moyen terme.

D'une façon générale, et bien que l'ampleur des retombées varie fortement d'un type de mesure à l'autre, les investissements économisant l'énergie, créateurs d'emplois et de revenus, relancent l'activité économique et ont un effet favorable sur le budget de l'état ; ils sont ce-

(*) La forme réduite d'un modèle donne l'impact sur toutes les variables endogènes de modifications de variables exogènes ou de modifications exogènes des variables endogènes.

pendant, à court terme, responsables d'une détérioration de la balance commerciale. Les impacts moyens, par milliard de francs de 1980 investis, sont de 500 unités sur l'emploi, 600 millions sur le déficit budgétaire et 350 millions sur la balance commerciale. Il faut cependant remarquer que, par rapport à un investissement moyen, les économies d'énergie et donc la réduction d'importations qui en résulte sont favorables à l'activité économique et soulagent les finances publiques d'un montant variant de 40 à 270 millions par milliard investi. D'autre part, le fait que les économies d'énergie sont permanentes transforme à moyen terme la détérioration de la balance commerciale en amélioration.

Etant donné l'état des finances publiques, le résultat concernant le plus directement l'état est évidemment la réduction du déficit due à un investissement qui vaut, rappelons-le, 600 millions en moyenne par milliard de francs investis. Même en faisant l'hypothèse que la méthode suivie surestime cet effet (existence de travail en noir, effets non instantanés sur l'emploi, part importée plus grande, fraude fiscale, ...), on peut raisonnablement supposer qu'une subvention de l'ordre de 30% des montants investis n'aggrave pas l'état des finances publiques. Les retombées étant d'autant plus favorables que l'importation induite est faible, il est évident qu'il y a intérêt à compléter la politique d'énergie par une promotion de l'industrie belge dans ce secteur.

CONCLUSION

L'analyse de la situation économique actuelle et prévue, qu'elle soit réalisée en se basant sur la théorie de la politique économique ou en employant des méthodes empiriques de modélisation, montre que la politique énergétique, et plus particulièrement la politique d'URE, constitue un volet indispensable de la politique économique. Les réalisations présentes sont faibles, de par la faute de tous les agents économiques, mais particulièrement de l'Etat, qui est le plus à même d'apprécier les retombées d'une telle politique. Les études menées indiquent que ce dernier pourrait, sans aggraver le déficit budgétaire, et à condition de tenir compte des caractéristiques propres de chaque mesure, subsidier de façon non négligeable les investissements économisant l'énergie. Ces études ne sont relatives qu'au bâtiment et le cas de l'industrie peut être différent. On peut objecter d'autre part que le rôle de distributeur de subsides n'est pas le rôle normal de l'Etat. Il n'empêche que des dizaines

et même des centaines de milliards sont en jeu, pour l'ensemble de l'économie nationale, et que, par conséquent, le principe d'une subsidiation doit être envisagé.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] A. BERCKMANS et F. THYS-CLEMENT : «Le modèle Breughel II», Miméo, Dulbea, janvier 1979.
- [2] BUREAU DU PLAN : «Etude de la demande intermédiaire d'énergie au niveau national, Rapport final scientifique, SPPS, D 1979/1191/8-A 1, 1978.
- [3] M. CHERIF et Y. GUILLAUME : «Les énergies douces et la lutte contre le chômage : un exemple d'application de la méthode input-output», Cahiers Economiques de Bruxelles, n° 81, 1^{er} trimestre 1979.
- [4] A. DAFFE et J. F. GUILMOT : «Modèle global du secteur énergétique. Communautés Européennes, Etude de cas pour la Belgique», Miméo, Core.
- [5] DULBEA : «Modèle central et modèles de demande finale», Rapport final scientifique, SPPS, D 1979/1191/8-A4, 1978.
- [6] DULBEA : «Energie et croissance», Document de travail n° 1, SPPS, Journées d'étude, Bruges, 17-18 novembre 1980 : «La demande et l'offre d'énergie en Belgique : évolution récente et perspectives dégagées par la recherche économique».
- [7] DULBEA : «La consommation d'énergie du secteur domestique», Document de travail n° 2, SPPS, Journées d'étude, Bruges, 17-18 novembre 1980 : «La demande et l'offre d'énergie en Belgique : évolution récente et perspectives dégagées par la recherche économique».
- [8] DULBEA : «Note sur les retombées macroéconomiques des investissements d'économie d'énergie dans les bâtiments», Document de travail n° 7, SPPS, Journées d'étude, Bruges, 17-18 novembre 1980 : «La demande et l'offre d'énergie en Belgique : évolution récente et perspectives dégagées par la recherche économique».
- [9] A. HOSTE : «Essai d'évaluation macroéconomique des économies d'énergie : le cas de l'isolation thermique des bâtiments», Mémoire de licence en Sciences économiques, Louvain-la-Neuve, janvier 1980.
- [10] E. S. KIRSCHEN (ed.) : «Economic Policies Compared. West and East. Volume 1 : General Theory», North Holland, 1974.
- [11] OPI : «Les mesures d'économie d'énergie dans le secteur du logement et leurs effets industriels», Programme URE, Commission I, Bruxelles, juin 1978.
- [12] OPI : «Les mesures d'économie d'énergie et leurs effets dans le secteur de l'industrie», Programme URE, Commission III, Bruxelles, juin 1978.
- [13] J. TINBERGEN : «On the theory of Economic Policy», North Holland, 1970.

L'analyse des processus industriels et la comptabilité énergétique

Le but de la comptabilité énergétique comme de toute comptabilité industrielle est de mieux représenter et de mieux analyser les processus de production. Cela permet d'apporter des réponses aux questions suivantes :

- Quels sont les secteurs grands consommateurs d'énergie ?
 - Quelles sont les différences dans la structure de la consommation d'énergie d'un pays à l'autre ?
 - Quels sont les produits industriels les plus directement menacés par la croissance du prix de l'énergie ?
 - Dans quel secteur faut-il rechercher des produits ou des procédés de remplacement ?
- etc.

Il y a deux approches pour obtenir une réponse à ces questions. La première approche est macroéconomique et globale, la deuxième approche est microéconomique ou analytique.

L'approche macroéconomique globale consiste à analyser les comptes nationaux représentés par les tableaux d'input-output, qui établissent l'interdépendance entre les différents secteurs de l'économie.

Cette analyse permet de remonter au coût énergétique de chaque groupe de produits.

Le premier avantage de cette approche est qu'elle donne des résultats rapides. Elle permet de grandes comparaisons entre pays. Par contre, pour que l'étude reste praticable, il est nécessaire de travailler par grands secteurs ce qui conduit à amalgamer des produits parfois très différents. En outre, les données statistiques disponibles ne sont pas toujours fiables. Enfin, cette étude est par nature assez loin de la technique et donne peu d'indications sur les changements ou les économies rendus possibles par le progrès technique.

L'approche microéconomique ou analytique consiste à suivre sur le terrain chaque processus de fabrication depuis les matières premières jusqu'aux produits finis et à comptabiliser toutes les quantités d'énergie consommées directement ou indirectement tout au long du processus.

L'inconvénient principal de cette approche est l'ampleur et la longueur du travail nécessaire pour aboutir à des résultats raisonnablement complets. En revanche, ces résultats sont plus sûrs, plus détaillés, plus fins. L'étude est menée plus près de la technique. Elle met en évidence les possibilités d'économies.

Selon les secteurs, les avantages et les inconvénients des deux approches ont un poids différent. La quantité d'énergie nécessaire pour faire une tonne d'acier ou une tonne d'aluminium ou de ciment est le type de résultats que l'on peut tirer de l'approche macroéconomique.

Par contre, l'énergie nécessaire pour fabriquer une tonne de produits chimiques ou une tonne de produits alimentaires, est une notion sans grand intérêt à cause de la très grande diversité des produits qui sont regroupés sous ces rubriques. Dans ce cas l'approche analytique du problème s'impose comme la meilleure solution.

Depuis un an et demi, dans le cadre du Programme national R.D. «Energie» géré par les services de Programmation de la Politique Scientifique nous avons poursuivi une étude de comptabilité énergétique par voie analytique.

Nous avons d'abord étudié d'une façon assez complète, le secteur de l'industrie papetière. Nous analysons pour le moment le secteur de l'industrie alimentaire. Le travail consiste à réunir dans chaque secteur industriel, grâce à des questionnaires, l'ensemble des données disponibles relatives aux consommations d'énergie. Ces données sont ensuite vérifiées, complétées, validées, grâce à des bilans d'énergie et à des visites auprès des responsables spécialisés de chaque entreprise.

Les données sont également présentées d'une façon uniforme (unités, conventions, références, etc.).

Enfin, les données sont analysées et comparées pour en tirer des conclusions utiles.

Une des conditions essentielles à la réussite d'un tel travail est l'établissement d'une collaboration confiante avec l'industrie. Sans cette collaboration, il est complètement illusoire de poursuivre des études de ce genre. En général, nous avons pu atteindre ce résultat en faisant apparaître l'intérêt que cette analyse présente pour les industriels eux-mêmes.

Cet intérêt est multiple. Le premier résultat d'une analyse énergétique est d'aider l'industriel à mettre en forme et à exploiter les résultats dont il dispose en général mais dont il n'a pas eu le temps et l'occasion de tirer tout l'enseignement.

La comparaison des chiffres correspondants pour différentes industries d'un même secteur est souvent intéressante et stimulante. Sans violer les secrets de fabrication, il est possible d'indiquer à chaque industriel comment il se situe par rapport à ses concurrents.

Nos visites permettent aussi aux industriels de recueillir des informations pratiques sur les moyens de réaliser des économies et sur la rentabilité des investissements correspondants. Les données disponibles dans ce domaine proviennent souvent des fournisseurs d'appareils et on peut craindre un certain manque d'objectivité.

Enfin, les remarques et les questions d'un expert extérieur qui voit un atelier de production pour la première fois, avec des yeux neufs, sont rarement sans utilité.

D'une façon générale, nous avons constaté des réactions différentes, notamment suivant la taille de l'entreprise. Mais dans l'ensemble, les réactions sont très positives.

Pour bien faire comprendre le type de résultats qu'on peut obtenir, nous pouvons décrire, d'une façon un peu plus détaillée, les résultats obtenus dans le secteur de l'industrie papetière.

Ces résultats ont été présentés en février 1980, au cours d'une demi-journée d'études organisée par les Services de Programmation de la Politique scientifique. Ils représentent le travail de six mois, réalisé par une équipe du Cadre Spécial Temporaire.

Grâce à la collaboration de la Fédération des Industries Papières (COBELPA), l'enquête a pu être menée dans toutes les usines productrices de pâtes, papier et cartons en Belgique.

Pour chacune d'entre elles, on a établi (fig. 1) un schéma général faisant apparaître les différentes étapes du processus de fabrication, les matières premières et produits intermédiaires ainsi que les consommations des différentes formes d'énergies et leur répartition entre les grandes étapes du processus de fabrication.

Dans chaque cas, pour poursuivre l'étude, il est indispensable de quantifier à la fois les quantités de matières et les quantités d'énergie qui circulent annuellement dans l'entreprise. Ce travail est compliqué par les transformations subies par l'énergie dans la plupart des papeteries. Ces transformations sont illustrées par la fig. 2 dans laquelle on indique

d'abord les achats d'énergie sous forme de combustibles, de vapeur et d'électricité. Une petite partie des combustibles est utilisée directement à la fabrication mais la plus grosse part est transformée en vapeur dans les chaudières.

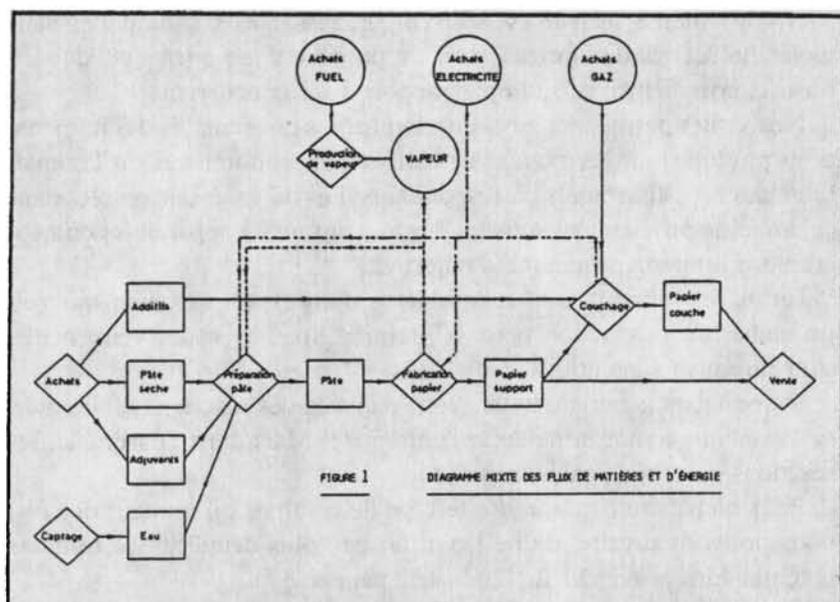


FIG. 1. – Diagramme mixte des flux de matières et d'énergie.

Une part importante de la vapeur est produite dans des chaudières de récupération alimentées par des déchets de fabrication. Dans certaines usines autoproductrices une partie de la vapeur est transformée en électricité. Pour chaque entreprise les chiffres relatifs aux achats d'énergie et aux consommations, peuvent être très différents.

A titre d'exemple, nous présentons ici quelques-uns des résultats typiques d'une étude de ce genre (tableau 1). Ce tableau permet de comparer un certain nombre de chiffres pour les 19 usines analysées.

La première colonne donne la consommation d'énergie mécanique au stade de la préparation et du raffinage de la pâte.

La deuxième et la troisième colonne donnent des chiffres relatifs à la fabrication du papier proprement dite.

Enfin, la quatrième colonne donne les chiffres relatifs au séchage.

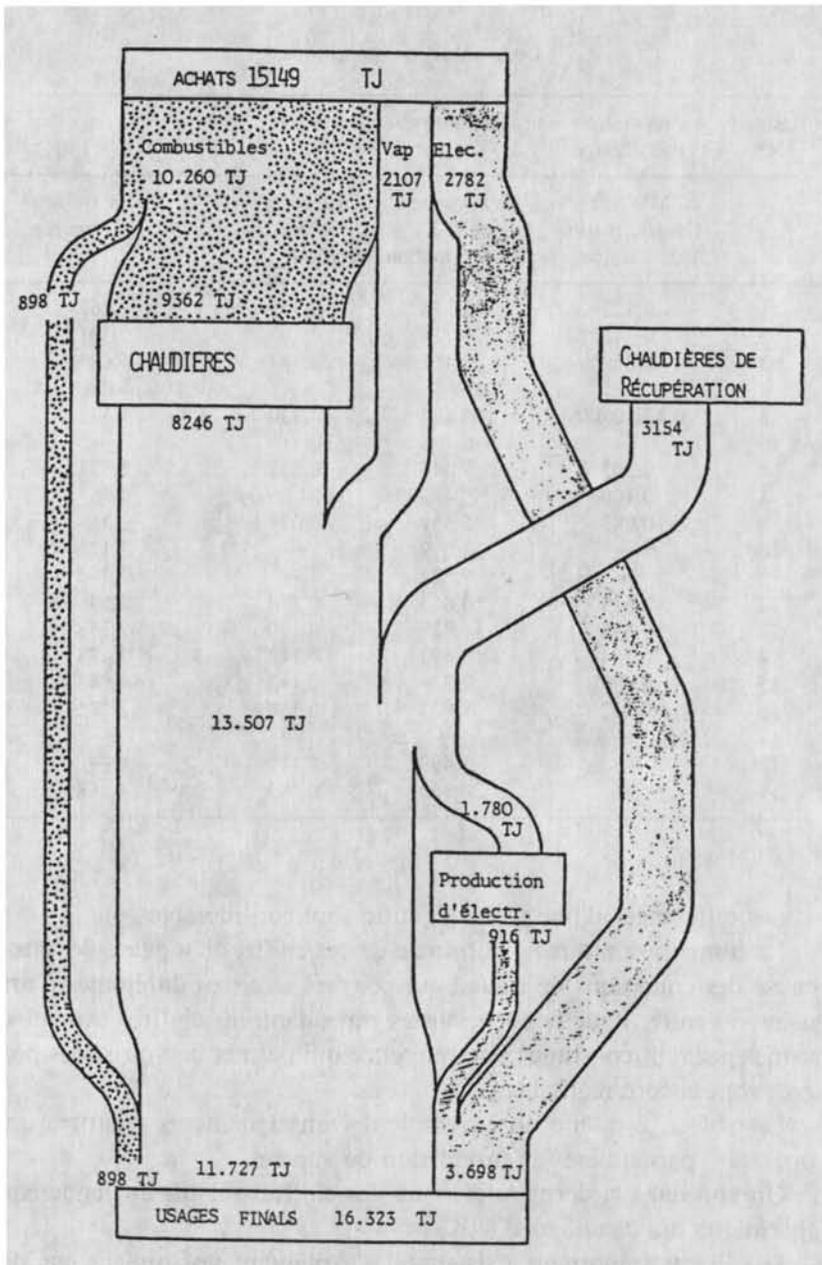


FIG. 2. - Flux globaux d'énergie.

TABLEAU 1

Consommations spécifiques				
Usine N°	Préparation et raffinage	Fabrication du papier et du carton		Séchage
		MWh/T Consommation spécifique	Gaz + vapeur GJ/T Consommation spécifique	
1	0,522	18,978	0,925	1,763
2	0,345	16,724	0,307	1,331
3	0,209	5,412	0,347	1,649
4	—	—	—	3,090
5	0,421-0,486	5,422	0,430	1,543
6	—	6,708	0,710	—
7	0,203	9,340	0,551	5,872
8	0,100	7,521-9,578	0,407-0,601	2,153
9	0,083	5,569	0,074	2,368
10	—	13,099	—	3,173
11	—	9,623	—	2,263
12	0,619	10,863	0,174	2,596
13	0,846	11,827	0,170	2,738
14	0,724	10,672	0,147	2,478
15	0,403	7,336	0,143	1,947
16	0,732	8,873	0,150	2,175
17	—	—	—	—
18	—	5,499	0,142	—
19	—	20,963	0,793	4,868

Les différences d'une usine à l'autre sont considérables.

La comparaison directe et brutale de ces chiffres n'a guère de sens à cause des conditions de travail qui peuvent être très différentes d'une usine à l'autre. Pour des spécialistes cependant, les chiffres des autres usines peuvent constituer une référence qui permet de voir si des progrès sont encore réalisables.

Le tableau 2 donne un ensemble de renseignements relatifs à une opération particulière : la production de vapeur.

On voit dans la dernière colonne, les chiffres relatifs au rendement thermique des chaudières.

Des écarts importants existent. Il s'expliquent notamment par des erreurs de mesure, par l'utilisation d'un outil plus ou moins ancien ou encore par l'une ou l'autre circonstance particulière.

TABLEAU 2

Production de vapeur au sein des usines (au départ de combustibles achetés)				
N°	Contenu énergétique des combustibles (TJ)	Contenu énergétique des condensats (TJ)	Contenu énergétique de la vapeur (TJ)	Rendement apparent
1	869,523	42,716	748,758	0,812
2	347,288	12,000	280,871	0,774
3	732,659	49,966	658,210	0,830
4	1.906,925	73,032	1.811,218	0,912
5	—	—	—	—
6	476,665	24,976	377,011	0,739
7	—	—	—	—
8	796,939	88,387	741,808	0,820
9	385,744	22,702	351,517	0,852
10	—	—	—	—
11	288,288	19,532	266,306	0,856
12	673,753	45,166	559,965	0,764
13	239,666	12,558	231,680	0,914
14	634,153	39,947	607,066	0,894
15	184,650	8,830	139,706	0,709
16	293,676	10,460	212,019	0,686
17	1.531,930	87,158	1.259,693	0,765
18	—	—	—	—
19	—	—	—	—
20	—	—	—	—
Total	9.361,859	537,429	8.245,827	0,823

Cependant la confrontation de chiffres calculés par la même méthode peut être instructive.

Le tableau 3 donne des chiffres de consommation spécifique d'énergie par tonne de produit. Le tableau montre surtout la grande diversité de situations aussi bien quant aux matières premières qu'aux produits finis.

Les deux tableaux suivants reprennent quelques chiffres relatifs à l'évolution de certaines consommations aux cours des années.

Le tableau 4 indique l'évolution de la consommation totale de chaleur et d'électricité par tonne de papier.

On constate une décroissance qui est une image des progrès techniques réalisés. Cette décroissance se marque uniquement pour la consommation de chaleur.

TABLEAU 3

Consommations spécifiques par produit

Produits finis	Produits de départ	Consommations spécifiques		
		Élec- tricité MWh/T	Va- peur GJ/T	Combus- tibles GJ/T
Pâte (sulfate)	Bois	0,749	21,214	0,155
Pâte (sulfite)	Bois	0,890	16,970	0,203
Papiers spéciaux	Bois + pâte	1,748	28,389	1,365
Papier couché et support	Pâte	1,358	13,742	1,202
Papier couché	Pâte + papier support	0,388	4,884	2,729
Papier couché	Pâte	0,675	6,039	0,359
Papiers couchés et spéciaux	Pâte	1,092	10,591	1,173
Papier couché et carton	Pâte + vieux papiers	1,216	13,535	0,746
Papier duplicateur	Pâte + vieux papiers	0,614	8,261	—
Papier écriture et impression	Pâte	1,272	13,409	—
Papiers divers	Pâte + vieux papiers	1,053	12,732	0,179
Papier à usage domestique	Pâte	1,778	10,374	4,863
Papier à usage domestique	Pâte + vieux papiers	1,142	7,702	4,191
Papier à usage domestique et carton	Vieux papiers	0,693	9,589	—
Papier emballage	Bois + vieux papiers	1,522	25,842	1,841
Papier magazine et journal	Bois + vieux papiers	1,536	7,023	0,087
Carton	Pâte + vieux papiers	0,856	13,474	—
Carton	Vieux papiers	0,793	20,963	—
Carton ondulé	Papier + vieux papiers	0,231	6,343	1,177
Carton bitumé	Vieux papiers	0,142	—	3,542

Des progrès supplémentaires sont sans doute freinés par la situation financière difficile de l'industrie papetière, qui empêche de réaliser tous les investissements souhaitables.

Le tableau 5 est relatif à l'évolution de l'autoproduction d'électricité dans les papeteries.

TABLEAU 4

Évolution de la consommation spécifique globale			
Année	Cons. spécifique globale totale (GJ/T)	Cons. spécifique globale combustibles + vapeur (GJ/T)	Cons. spécifique globale électricité (GJ él/T)
1970	17,219	14,371	2,848
1971	16,903	14,287	2,616
1972	16,242	13,781	2,461
1973	16,583	14,139	2,444
1974	15,984	13,489	2,495
1975	16,763	14,064	2,699
1976	15,556	12,907	2,649
1977	14,903	12,323	2,580
1978	14,774	12,111	2,663

TABLEAU 5

Évolution de l'auto-production d'électricité					
Année	Nombre d'usines auto-productrices	Auto-production (GWh)	Consommation totale (GWh)	Part de l'auto-production (%)	Part des papeteries dans le total de l'électricité auto-produite (%)
1970	15	254,9	900,6	28,30	5,37
1971	14	296,2	1.007,5	29,40	6,00
1972	11	330,6	1.058,0	31,25	5,90
1973	10	339,3	1.122,3	30,23	6,41
1974	10	335,1	1.160,2	28,88	5,80
1975	10	234,6	943,4	24,87	5,72
1976	9	267,8	1.067,3	25,09	6,55
1977	7	258,9	1.057,6	24,48	6,76
1978	7	235,0	1.088,3	21,59	6,30

On sait que la production combinée d'énergie électrique et de vapeur de chauffe est un des moyens de réaliser une substantielle économie d'énergie primaire.

On constate malheureusement qu'au cours des neuf dernières années, ces productions couplées ont connu une sensible décroissance dans l'industrie papetière.

Les causes de cette évolution regrettable sont complexes et ce n'est pas la place ici pour les analyser en détail.

Le rôle de la comptabilité d'énergie proprement dite se limite d'ailleurs à faire apparaître ce type d'évolution et à provoquer les discussions, éventuellement les mesures de corrections nécessaires.

Enfin, la figure 3 donne une image de l'évolution des sources d'énergie achetée par l'industrie papetière au cours des dernières années. On peut suivre la substitution d'un combustible à un autre : le gaz naturel a entièrement supplanté le charbon et le gaz de cokeries et partiellement le fuel.

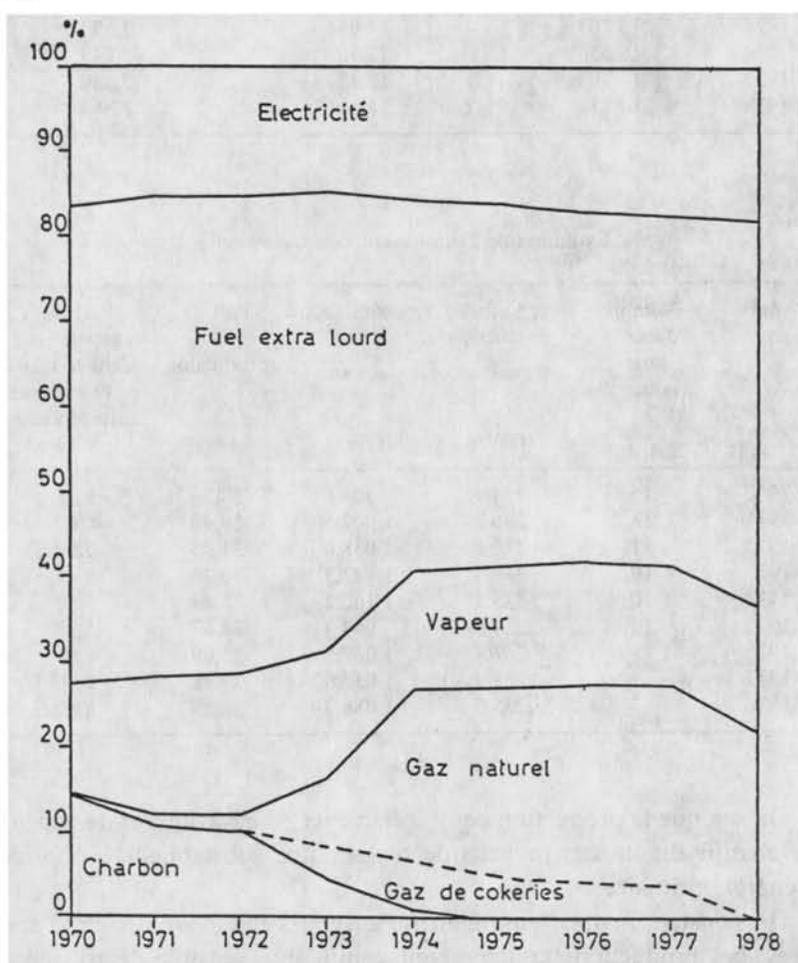


FIG. 3. - Evolution de la structure des achats d'énergie.

Ce type de substitution est techniquement facile. Les industriels s'adaptent au combustible qui conduit au meilleur prix de revient. Mais on observe une certaine inertie qui est liée au rythme de renouvellement de l'outil de production.

Pour résumer sommairement quelques conclusions de cette étude, on peut dire que des économies sont réalisables :

- 1) au niveau des transformations de l'énergie, notamment par le développement de la production combinée de vapeur et d'électricité ;
- 2) en améliorant l'isolation thermique des conduites de vapeur ;
- 3) en modifiant plus profondément les machines continues, notamment par l'installation de hottes fermées avec récupérateurs ;
- 4) par une évolution vers des produits moins élaborés. Ce moyen ne relève pas du tout de la technique mais plutôt de l'éducation des consommateurs. C'est un bon exemple du caractère interdisciplinaire des études relatives à l'énergie.

CONCLUSIONS GÉNÉRALES

Les études de comptabilité énergétique et d'analyse des processus industriels indiquent les voies dans lesquelles des réductions considérables des consommations d'énergie sont possibles.

La première voie est celle de la politique sectorielle.

Il ne faut jamais perdre de vue que la sidérurgie, la métallurgie en général, certaines branches de la chimie, le ciment, le verre et, d'une façon générale, les industries lourdes sont, par nature, des secteurs grands consommateurs d'énergie qui subissent un handicap dans un pays comme le nôtre où pratiquement toute l'énergie est importée.

Il y a là une raison supplémentaire de chercher à faire évoluer nos industries vers des produits finis à très haute valeur ajoutée.

La deuxième voie est celle des investissements purs et simples.

A de très nombreux endroits dans l'industrie, des réductions de consommation d'énergie importantes sont réalisables par une meilleure isolation, ou grâce à des échangeurs plus importants. Ces appareils sont simples et parfaitement connus. Le seul et unique problème est celui du calcul de leur rentabilité.

Celle-ci est généralement bonne dans les circonstances actuelles. En outre, le risque correspondant est faible.

Ces investissements souffrent cependant de leur position extérieure par rapport à la stratégie générale de l'entreprise.

La troisième voie est liée aux progrès techniques : de meilleures mesures (notamment des débits de vapeur), un meilleur contrôle, des systèmes plus ou moins complexes de récupération d'énergie sont à développer.

Ce type de progrès dépend à la fois de nouvelles études et d'investissements.

Enfin, la quatrième voie est celle de l'association de plusieurs activités dont les besoins en énergie sont complémentaires.

L'exemple type est celui de la production combinée d'électricité et de vapeur de chauffe que nous avons déjà évoquée. Les développements dans cette voie sont limités par la complexité d'exploitation que cela entraîne, la nécessité de prévoir les fluctuations de la production et celle de disposer d'un personnel bien formé.

Dans tous ces cas une intervention de l'Etat est susceptible de promouvoir ces réductions de consommation.

Dans certains secteurs, il semble même que l'initiative privée reste dans l'expectative, dans la crainte de perdre le bénéfice d'aides qui seraient décidées dans les prochains mois.

La capacité d'intervention de l'Etat est considérable sans en venir ni aux interdictions, ni au rationnement. Elle peut prendre plusieurs formes : le financement des études générales, l'aide financière aux investissements et encore et surtout, une intervention sur les tarifs aussi bien des combustibles que de l'électricité.

A l'heure actuelle, les tarifs sont loins d'être toujours un incitant à l'économie.

psychologie et énergie : une approche des représentations en matière d'économies d'énergie

INTRODUCTION

Il serait sans doute banal de commencer cet article en évoquant l'importance actuelle des problèmes énergétiques. Nous sommes tous sinon convaincus de la pertinence des termes dans lesquels ils sont généralement posés, du moins informés de leur actualité. Ce qui paraîtra sans doute moins commun aux yeux de certains, c'est d'affirmer que ces problèmes concernent la psychologie. Ou plutôt que les psychologues en font un objet d'investigation et de réflexion. Pourtant, puisque la psychologie est définie comme étude des conduites, de leurs modalités, de leurs déterminants, un tel fait ne devrait pas surprendre. Consommer de l'énergie, en consommer plus, en consommer moins, l'économiser de telle ou de telle manière, n'est-ce pas agir, changer ses actions, leur attribuer une signification, modifier cette dernière, prendre position, faire des choix, bref déterminer de manière consciente ou inconsciente un ensemble plus ou moins vaste et structuré de conduites.

Dans la pratique, ces conduites sont multiples et nous ne tenterons pas d'en dresser la liste ; car même en se limitant au consommateur particulier (ce que nous ferons dans cet article), on constate rapidement qu'en définitive, l'ensemble de nos actes impliquent d'une façon plus ou moins directe et immédiate la consommation d'énergie. Que l'on songe par exemple aux répercussions d'habitudes vestimentaires sur l'utilisation du chauffage, ou encore de l'organisation de la vie familiale sur l'éclairage d'un logement, et l'on perçoit l'importance de l'inversion du lien. Changer la consommation d'énergie sera sans doute aussi se vêtir autrement, organiser autrement sa maison. Ces deux implications, prises ici à titre purement illustratif, indiquent déjà combien changer sa consommation d'énergie c'est aussi changer sa vie. C'est dire l'import-

tance psychologique du phénomène «énergie» vu simplement sous cet angle.

Une telle analyse reste cependant encore limitée et son élargissement à la dimension sociale et représentative complète si besoin en était l'évaluation de cette importance. La question se déplace alors vers le pôle des attitudes et des significations individuelles et sociales des conduites en relation avec l'énergie.

Conscients de cette importance, des psychologues, se penchent plus particulièrement depuis quelques années sur l'économie d'énergie et la réduction de la consommation par des utilisateurs privés. On se reportera notamment à Seligman, Clive & Darley, 1977, Becker, 1978, Cunningham & Lopreato, 1977, Stern & Kirkpatrick, 1977, Winett, Kagel, Battalio & Winkler, 1978, et Pallak, Cook & Sullivan, 1980, pour plus d'information sur ce sujet.

Nous voudrions ici esquisser l'une des voies d'approche qui furent proposées, en tentant de la situer par rapport à des orientations plus théoriques. Ce sera pour nous l'occasion d'évoquer plus particulièrement deux analyses réalisées au Laboratoire de Psychologie Industrielle et Commerciale de l'Université Libre de Bruxelles dans ce domaine. Ces analyses doivent être considérées comme largement exploratoires. Dans l'état actuel des choses, elles contribuent sans doute à cerner un champ de réflexion et d'étude plutôt qu'à définir des réponses élaborées.

MÉTHODOLOGIE

Une première approche de notre objet d'étude fut réalisée par le biais d'une trentaine d'entretiens et d'une discussion de groupe (9 personnes). Les questions que nous soulevions au cours de ces interviews étaient très générales et concernaient principalement les thèmes suivants :

- Y a-t-il réellement une crise de l'énergie ?
- Si oui, quelles en sont les causes ? qui sont les responsables ?
- Quelles en sont les manifestations concrètes ?
- Quelles en sont les issues possibles ?
- Qu'entend-on par économie d'énergie ?
- Pourquoi des économies ?
- Qui peut exercer un rôle d'incitant en matière d'économie d'énergie ?
- Que faut-il penser des actions réalisées dans ce domaine ?
- Qui réalise des économies d'énergie ?

TABLEAU 1 : questionnaire 1

-
1. Economiser l'énergie concerne principalement les particuliers.
 2. Economiser l'énergie est une manière de combattre l'inflation.
 3. Economiser l'énergie c'est s'inquiéter des générations futures.
 4. Economiser l'énergie ne sert qu'à alléger le budget familial.
 5. Economiser l'énergie est une contribution passive aux problèmes énergétiques en général.
 6. Economiser l'énergie va modifier notre mode de vie.
 7. Economiser l'énergie c'est réaliser une importante économie d'argent.
 8. Economiser l'énergie c'est vivre à une température de 19°.
 9. Economiser l'énergie c'est préserver l'environnement de la pollution.
 10. Economiser l'énergie c'est s'associer à la collectivité face à ce problème.
 11. Economiser l'énergie est une atteinte à notre liberté individuelle.
 12. Economiser l'énergie n'est qu'un remède provisoire à ce problème.
 13. Economiser l'énergie c'est permettre à l'armée d'avoir un minimum de ressources disponibles.
 14. Economiser l'énergie c'est se préserver une température agréable pour les mois à venir.
 15. Economiser l'énergie concerne surtout les grands consommateurs comme les entreprises.
 16. Economiser l'énergie oblige à faire des investissements d'argent.
 17. Economiser l'énergie c'est prévoir un avenir digne.
 18. Economiser l'énergie n'est que retarder le moment d'une pénurie toute proche.
 19. Economiser l'énergie c'est augmenter le temps disponible pour la recherche d'autres énergies.
 20. Economiser l'énergie est une nécessité dont il faudra désormais s'accommoder dans l'avenir.
 21. Economiser l'énergie c'est pour le particulier consommer de manière plus rationnelle.
 22. Economiser l'énergie c'est faire des investissements d'argent rentables.
 23. Economiser l'énergie c'est participer activement et efficacement au mouvement d'économie.
 24. Economiser l'énergie c'est le signal d'alarme d'un problème très grave.
 25. Economiser l'énergie ne va presque rien changer à nos habitudes.
 26. Economiser l'énergie marque l'arrêt de l'évolution de notre société d'abondance.
 27. Economiser l'énergie c'est vivre à une température de 21° mais en isolant l'habitation.
 28. Economiser l'énergie c'est culpabiliser les consommateurs non responsables des problèmes.
 29. Economiser l'énergie c'est faciliter la recherche d'une solution à la crise économique mondiale.
-

De ces échanges ressortirent un ensemble de points clés dont certains donnèrent lieu à une investigation plus poussée, principalement sous la forme de questionnaires (Beausire, 1980 ; Tomber, 1980). Nous re-

tiendrons de cet ensemble essentiellement l'émergence de l'importance d'un mode particulier d'évocation de la représentation du concept «économie d'énergie». Elle trouve son origine dans le fait qu'une ligne de force semblait se dégager de nos interviews. Elle peut se résumer ainsi : les problèmes énergétiques étaient jugés importants, mais de manière différentielle par rapport à d'autres problèmes actuels. Qui plus est, l'estimation individuelle de cette importance semblait traduire l'existence de représentations diversifiées de la signification sociale et individuelle de la notion même d'économie d'énergie.

Afin de préciser davantage une telle analyse, plusieurs questionnaires spécifiques furent élaborés. Outre des questions d'identification, ces questionnaires soulevaient divers problèmes correspondant à des hypothèses issues de l'étape clinique d'investigation. La plupart des questions reprenaient d'ailleurs telles quelles des propositions ou des qualifications qui nous furent livrées lors des entretiens et discussions. De cet ensemble, nous retiendrons ici deux questionnaires. Le premier concerne les significations et implications des économies d'énergie (questionnaire 1 – tableau 1). Le second propose une esquisse de portrait de celui qui fait des économies d'énergie (questionnaire 2 – tableau 2). Les réponses au premier questionnaire étaient fournies par l'expression d'un niveau d'accord avec chacune des propositions, selon quatre niveaux (pas du tout d'accord, pas d'accord, d'accord, tout à fait d'accord).

TABLEAU 2 : questionnaire 2

1. Jeune	âgé
2. Conformiste	marginal
3. Intellectuel	manuel
4. Rigoureux	fantaisiste
5. Méfiant	confiant
6. Laborieux	désœuvré
7. Calme	nerveux
8. Communautaire	individualiste
9. Engagé politiquement	apolitique
10. Optimiste	pessimiste
11. Habitant la ville	habitant la campagne
12. Casanier	voyageur
13. Féminin	masculin

Pour le deuxième questionnaire, les treize items devaient être évalués sur une échelle bipolaire à 4 cases. Le sujet devait répondre en mettant une croix dans la case choisie en raison de la pertinence des qualificatifs opposés, en fonction de sa propre représentation de celui qui réalise effectivement des économies d'énergie.

Les questionnaires furent soumis à 140 personnes. Le tableau 3 fournit une description sommaire de cet échantillon au travers de quelques variables d'identification.

TABLEAU 3

Description de l'échantillon au travers de quelques variables d'identification					
Age	n	Sexe	n	Profession	n
18-25 ans	28	Masculin	82	Ouvrier	3*
26-35 ans	45	Féminin	58	Employé	50
36-45 ans	26			Cadre supérieur	12
46-55 ans	23			Cadre moyen	29
+ de 56 ans	18			Indépendant	6
				Profession libérale	11
				Sans profession	29
Cylindrée de la voiture		n**		Logement	
					n
- de 1000 cc	22	Propriétaire	75		
1001-1500 cc	67	Locataire	65		
1501-2000 cc	32				
+ 2001 cc	9				
Type d'habitation	n	Type de chauffage	n		
Studio	9	Bois	0		
Appartement	47	Gas-oil	79		
Maison unifamiliale	60	Charbon	7		
Bungalow	6	Electrique	3		
Villa	18	Gaz	50		
		Autre	1		

* Il faut noter le faible nombre d'ouvriers qui limite les résultats de l'étude à une frange spécifique de consommateurs particuliers.

** 10 personnes ne possédaient pas de voitures.

RÉSULTATS

Disposant des réponses de nos 140 répondants aux deux questionnaires, nous nous sommes proposés de réaliser sur chacun des ensembles de 140 profils (ou protocoles) ainsi définis une analyse typologique complétée d'une analyse binaire classique du tableau qui en serait issu. Ce choix méthodologique résulte de l'adéquation de ces méthodes aux hypothèses formulées. Pour la bonne compréhension des résultats, il suffira de rappeler ici que l'analyse typologique permet de détecter l'existence de groupes homogènes de profils de réponses au sein d'un ensemble de protocoles. La méthode consiste à regrouper entre eux les profils semblables, de manière à former des lots qui diffèrent autant que faire se peut les uns des autres. On obtient alors des profils moyens caractéristiques d'un nombre restreint de groupes qui définissent des types de réponses. Ces types correspondent pour nous à des modes d'appréhension du concept évalué (économie d'énergie ou «portrait de celui qui économise») au travers des questions qui ont servi à les définir. Les profils moyens, ou types, sont alors analysés par la méthode d'analyse binaire classique (Faverge, 1975).

Celle-ci permet de déterminer si une structure fondamentale et simple peut expliquer leur composition. Cette structure est recherchée sous la forme d'un nombre réduit de facteurs (axes) ou de pôles qui permettent d'expliquer la diversité des types en termes des spécificités des questions. La méthode se fonde sur l'idée d'existence d'un espace commun aux types et aux variables. Elle tente alors d'en définir les dimensions sur base de considérations mathématiques qui reflètent un modèle psychologique général. C'est ainsi que ces dimensions seront interprétées comme révélatrices et sans doute explicatives des réponses et donc des modèles de représentation qui y ont présidé (pour plus de détails sur ce sujet, on se référera à Karnas, 1981).

L'analyse typologique des réponses au questionnaire 1 a conduit à une répartition en six groupes dont les profils moyens ont été analysés par la méthode d'analyse binaire classique. Celle-ci donne lieu à des racines latentes qui légitiment une interprétation des résultats limitée à deux facteurs qui permettent de rendre compte de près de 80% de la variabilité des réponses (% de variance ou d'inertie expliquée). On est donc en droit d'estimer que compte tenu de la nature des questions posées – et dans le cadre strict que celles-ci définissent –, les représentations des économies d'énergie ainsi révélées s'expliquent en termes de

deux dimensions fondamentales. Ces dernières prennent signification au travers des regroupements spécifiques d'items qui les ont «générées». Elles justifient la figuration bi-dimensionnelle que fournit la méthode et qui apparaît à la figure 1. La structure que cette dernière représente est considérée comme le reflet de la structure psychologique fondamentale qui organise les réponses.

Cette figure permet d'identifier un axe (I) caractérisé aux extrêmes par des affirmations selon lesquelles «économiser l'énergie», «c'est porter atteinte à notre liberté individuelle» (11), «c'est permettre à l'armée d'avoir un minimum de ressources disponibles» (13), «c'est culpabiliser les consommateurs non responsables des problèmes» (28), ou encore que «l'économie d'énergie concerne surtout les ... grandes entreprises» (15), opposés à des items comme «c'est une nécessité pour l'avenir» (20), «c'est s'inquiéter des générations futures» (3), «c'est modifier notre mode de vie» (6).

Il s'agit donc d'une dimension qui oppose des expressions de rejet et de prise en charge des problèmes liés aux économies d'énergie. Cet axe voit donc se confronter une acceptation et un refus de l'économie. Nécessité à l'un des pôles, celle-ci apparaît comme contrainte d'un problème mal posé à l'autre pôle.

Le deuxième axe (II) oppose quant à lui des propositions comme «l'économie d'énergie», «concerne principalement les particuliers» (1), «ne va presque rien changer à nos habitudes» (25), «marque l'arrêt de notre société d'abondance» (26), à une extrémité, et «c'est s'associer à la collectivité» (10), «augmenter le temps disponible pour la recherche d'autres énergies» (19), «une manière de combattre d'inflation» (2), à l'autre extrémité. Cette deuxième dimension apparaît comme un axe «d'individualisation-collectivisation» opposant une perception de l'économie d'énergie comme problème individuel (des personnes, des particuliers) à une perception de l'économie d'énergie vécue comme un problème collectif où la notion de collectivité pourrait entraîner un choix de société.

D'une manière plus synthétique, ces axes semblent en fait définir trois pôles auxquels correspondraient des perceptions ou représentations types de l'économie d'énergie : un pôle de rejet (phrases 13, 28, 11, 15), un pôle de prise en charge individuelle où l'économie prend assez bien l'allure d'une ascèse (phrases 1, 8, 17, 26, 7), et un pôle de prise en charge collective où l'économie est associée à l'idée d'un changement plus fondamental de la société (phrases 10, 19, 2, 29).

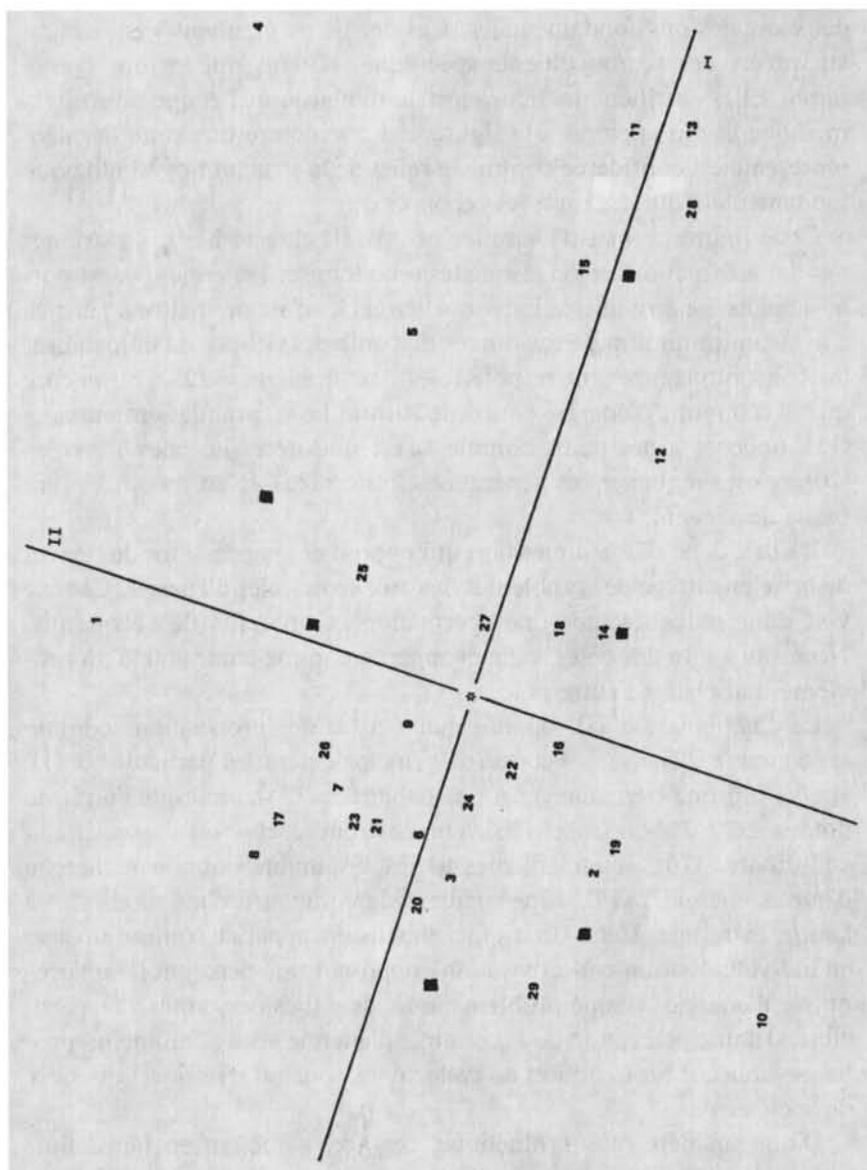


FIG. 1. — Représentation dans le plan défini par les deux premiers axes issus de l'analyse binaire classique du questionnaire 1.
 Les ■ représentent les types, les nombres localisent les propositions (tab. 1).

L'examen des localisations des groupes de sujets ou types par rapport aux axes et pôles permet de se convaincre de l'existence de représenta-

tions cohérentes et plus ou moins nuancées qui s'expriment dans les termes que nous venons de préciser. Les pôles définissent des représentations latentes ou idéalisées dont les types sont les concrétisations manifestes et actualisées.

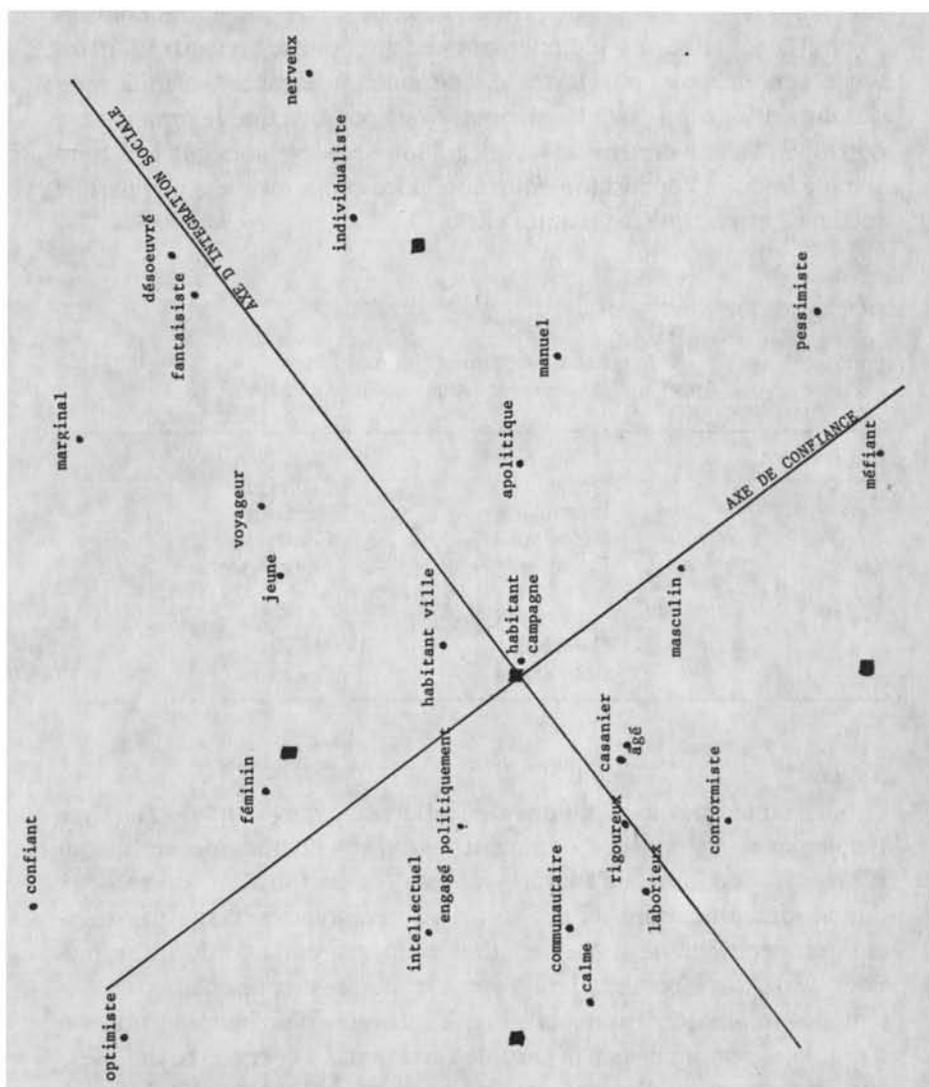


FIG. 2. — Représentation dans le plan défini par les deux premiers axes issus de l'analyse binaire classique du questionnaire 2.
Les ■ représentent les types.

Les analyses similaires opérées sur les données relatives au questionnaire 2 conduisent également à l'obtention d'un diagramme à deux dimensions. Ici, cinq types se dessinent à l'issue de l'analyse typologique et leur étude par la méthode binaire permet de réaliser une figure dans un plan qui rend compte de près de 80 % de la variabilité des données (figure 2). Le tableau 4 indique pour chacun des axes retenus les items aux coordonnées les plus fortes afin de tenter de dégager la signification des dimensions qui y sont associées. Nous pensons que le premier axe correspond à une dimension «d'intégration sociale», alors que le second semble traduire l'opposition entre confiance et optimisme d'une part, et méfiance et pessimisme d'autre part.

TABLEAU 4

Items aux coordonnées les plus fortes dans l'analyse binaire classique du questionnaire 2		
<i>Axe 1</i>	Nerveux Individualiste Désœuvré Fantaisiste	Laborieux Calme Conformiste Communautaire
<i>Axe 2</i>	Confiant Optimiste	Méfiant Pessimiste

A l'examen des localisations des différents types issus de l'analyse typologique, on constate comment les représentations de «celui qui réalise des économies d'énergie» s'articulent en fonction de ces deux dimensions, traduisant ici des sortes de stéréotypes sociaux très tranchés et somme toute fort caricaturaux (du genre «le conformiste méfiant», ...). Il faut bien garder à l'esprit ici que ces représentations reflètent des images de l'autre et non l'expression d'un auto-portrait ou d'opinions personnelles à l'égard de l'économie d'énergie; ce qui n'exclut évidemment nullement que ceci ne puisse influencer cela. Mais intrinsèquement, c'est sans aucun doute davantage l'attribution de motivations plutôt que les mobiles personnels que concrétisent de tels résultats.

CONCLUSION

En guise de conclusion, nous voudrions insister ici à nouveau sur le caractère préliminaire des analyses présentées. Les méthodologies utilisées, comme c'est toujours le cas lors du recours aux questionnaires, ne livrent que des résultats conditionnés par les questions posées et par leur structure. Comme telles, elles permettent sans doute de valider certaines hypothèses relatives aux représentations (pour nous limiter à ce qui nous occupe ici) ; en aucun cas elles ne peuvent garantir l'exhaustivité des modèles qu'elles fournissent.

En d'autres termes, les pôles de signification de l'économie d'énergie que nous avons mis en évidence – rejet, implication individuelle, implication collective –, les dimensions des stéréotypes de celui qui réalise des économies qui nous furent révélées, sont fonction de la spécificité des questions posées. Mais cela ne doit pas nous arrêter dans notre recherche, au contraire. En effet, il nous semble avoir montré ici clairement que des représentations structurées, et construites, de l'économie d'énergie coexistent. Si ces représentations peuvent être extrêmes ou nuancées, en tout cas, elles semblent répondre à une structure latente définie par quelques axes significatifs. Et si nous ne pouvons prétendre ici les avoir explorés tous, il nous paraît déjà important d'avoir montré la pertinence de certains. Qui plus est, le fait d'avoir mis en évidence le rôle différenciateur que ces dimensions jouent parmi les répondants, nous semble indiquer si besoin en était, l'existence de stratégies individuelles différenciées en matière d'énergie. Ainsi se trouve exhibée l'importance de la dimension représentative et donc psychologique et sociale dans l'approche du phénomène «économie d'énergie». Celui qui prétendrait pouvoir se passer de la prendre en considération s'exposerait sans doute à bien des déconvenues lorsqu'il voudrait passer à l'action. On en sera convaincu en considérant que sous des formes diverses, les représentations mises ici en évidence se réfèrent à des modèles de désirabilité sociale et/ou individuelle plus ou moins diversifiés.

D'une certaine manière, une telle analyse va dans le sens de recherches qui au départ d'une approche plus «behavioriste» de la réduction de la consommation d'énergie montrent par ailleurs l'importance de facteurs psycho-sociologiques. C'est ainsi que l'effet de réduction de la consommation obtenu par la simple connaissance régulière et rapprochée de sa consommation individuelle se trouve être affecté par

la possibilité de comparer sa performance à celle d'autrui ou encore par le fait que l'on a été amené à prendre publiquement position en faveur des économies d'énergie (Pallak *et al.*, 1980).

D'une certaine manière, nous touchons ici une des questions parmi les plus fondamentales de la psychologie appliquée puisque nous nous trouvons confrontés au problème de la nature du lien entre «attitudes» et «comportements», entre «représentations» et «conduites», en référence à la dimension sociale.

Sans doute, l'analyse des problèmes liés à l'énergie constitue-t-elle un terrain privilégié d'étude de cette question (ou de ces questions). Et cela tant par la possibilité d'introduction d'indices objectifs d'évaluation quasi-continue des conduites qu'elle permet (consommation d'énergie par la personne), que par l'importance concrète et sociale des questions qu'elle pose.

RÉFÉRENCES

- BEAUSIRE, G. – *Tentative d'analyse du phénomène d'épargne dans la consommation d'énergie*. Laboratoire de Psychologie Industrielle et Commerciale, U.L.B., Bruxelles, 1980 (mémoire de licence).
- BECKER, L. – Joint effect of feedback and goalsetting on performance : A field study of residential energy consumption. *Journal of Applied Psychology*, 1978, 63, 428-433.
- CUNNINGHAM, W., LOPREATO, S. – *Energy use and conservation incentives : A Study of the southwestern United States*, New York : Praeger, 1977.
- FAVERGE, J. M. – *Méthodes statistiques en Psychologie Appliquée, III*. Paris, P.U.F., 1975.
- KARNAS, G. – *L'analyse binaire classique et le concept de style*. Laboratoire de Psychologie Industrielle et Commerciale, U.L.B., Bruxelles, ronéo sous presse au *Travail Humain*, 1981.
- PALLAK, M., COOK, D., SULLIVAN, J. – Commitment and energy conservation. *Applied Social Psychology*, 1980, 1, 235-253.
- SELIGMAN, C., DARLEY, J. – Feedback as a means of decreasing residential energy consumption. *Journal of Applied Psychology*, 1977, 62, 363-368.
- STERN, P., KIRKPATRICK, E. – Energy behavior. *Environment*, 1977, 19, 10-15.
- TOMBERG, A. – *Attitudes face au problème de l'énergie et évaluation du coût de celle-ci par la méthode des intervalles successifs*. Laboratoire de Psychologie Industrielle et Commerciale, U.L.B., Bruxelles, 1980, (mémoire de licence).
- WINETT, R., KAGEL, J., BATTALIO, R., WINKLER, R. – Effects of monetary rebates, feedback, and information on residential electricity conservation. *Journal of Applied Psychology*, 1978, 63, 73-80.

l'énergie : un enjeu et un mythe

Parmi les divers aspects de la « crise » qui aurait commencé en 1974, les menaces pesant sur les sources d'énergie occupent une place prépondérante. Un méchant sondage, publié en février 1981 par *Télé-Moustique* ⁽¹⁾, désignait les pays de l'OPEP comme premiers responsables de la crise. Certes, il ne convient d'accorder trop de foi aux résultats d'un sondage et surtout pas à un sondage aussi mal réalisé que celui-là. Mais que la culpabilité des pays pétroliers (assimilés, à tort, dans l'opinion publique, aux seuls pays arabes) soit ainsi réaffirmée dans un magazine populaire est un indice supplémentaire du privilège accordé à l'énergie (et aussi, reconnaissons-le, à une certaine xénophobie) dans les caractéristiques de la crise actuelle.

L'énergie, mot vague dont l'imaginaire social camoufle la réalité scientifique sous des représentations fortement teintées d'émotivité (les « gueules noires » des mineurs, la pollution des centrales atomiques, la propreté du tout électrique), « sert » non seulement à faire tourner les industries, et donc à fournir du travail à un grand nombre, mais aussi à assurer une vie quotidienne confortable. La crise de l'énergie concerne l'économique comme le culturel. Il faut du charbon et du pétrole pour produire de l'électricité, laquelle actionne aussi bien les aciéries que la cafetière familiale. Et si le pétrole vient à manquer, la pénurie affectera aussi bien les fabriques d'objets semi-finis que la circulation automobile. C'est d'ailleurs le plus souvent par la vie de tous les jours que la menace d'appauvrissement énergétique se fait sentir. La radio, la télévision, les journaux, nous enjoignent à faire des « économies d'énergie » : il nous faudrait veiller à baisser le chauffage, à ne laisser aucune lampe allumée quand son éclairage n'est plus utile, à rouler moins vite en voiture, à recourir davantage aux moyens de transport collectifs, à

(1) « La crise en question », dans *Télé-Moustique*, N^{os} 2871 et 2872 des 5 et 12 février 1981.

compter plus que par le passé sur les ressources de nos propres corps. D'habiles commerçants voient les moyens de traduire ces conseils ou injonctions en fructueuses affaires : doubles vitrages, automobiles hyper-frugales, isolations thermiques diverses. En France, la chasse au gaspillage est l'occasion d'une innovation de plus dans la culture de masse : la lutte antigaspis prend l'allure d'une campagne patriotique. Les gaspilleurs sont tenus, à la limite, pour de mauvais Français (chez nous, on les appellerait «inciviques»). Qui évaluera jamais l'énergie consommée pour nous convaincre d'économiser l'énergie ? Et les profits que cette consommation aura rapportés, et à qui ?

Ainsi peu à peu s'introduit dans la conscience collective (acceptons provisoirement ce concept, que nous distinguerons d'ailleurs soigneusement de celui d'opinion publique ⁽²⁾ : en gros, nous en ferons la partie «pensée» de l'imaginaire social) le nouveau mythe de l'énergie à épargner comme on épargne son corps de la débauche pour mieux contribuer à la reproduction et à l'accroissement d'une race vigoureuse. Épargner, voire refuser d'utiliser, car le nouveau mythe en rejoint d'autres, à commencer par celui de l'*âge d'or*. Le gaspillage d'énergie est symptomatique d'une société qui a perdu le sens de l'essentiel : une part considérable de l'énergie consommée l'est pour produire des objets inutiles, pour encourager des modes de vie aliénants, dont la voiture, par exemple, serait le symbole. D'où le succès, qui se traduit par les progrès électoraux des partisans de l'écologisme, de l'utopie ruraliste, évocatrice d'un monde où la consommation d'énergie était stable et ne s'appliquait qu'à la production de biens indispensables.

Il s'agit bien d'un mythe, c'est-à-dire d'un élément idéologique ayant pour fonction de légitimer divers comportements publics et privés, excluant toute vérification expérimentale ou même examen spéculatif approfondi. Ainsi, le mythe de l'énergie épargnée, qui est aussi celui de la «bonne» énergie, s'unit-il à celui de la société villageoise, communauté plutôt ⁽³⁾, parée de toutes les vertus de solidarité et de sécurité affective, dans le registre des «univers symboliques de légitimation», dont parlent Berger et Luckmann ⁽⁴⁾. Au sein de ces univers, ces

⁽²⁾ V. JAVEAU Cl., «Conscience collective et opinion publique», *Cahiers Durkheimiens*, N° 2/1977, pp. 17-32.

⁽³⁾ Je fais référence ici à l'opposition classique société (*Gesellschaft*) – communauté (*Gemeinschaft*) que nous devons à Ferdinand Tönnies.

⁽⁴⁾ BERGER, P. et LUCKMANN, Th., *The Social Construction of Reality*, Harmondsworth, Peregrine Books, 1979, 249 pages.

mythes s'opposent à celui de la science, dont les prétentions à l'infailibilité et à la prédictivité morale servent à légitimer les pratiques en apparence rationnelles (mais en apparence seulement) qui fondent l'économie de la croissance et l'ordre social de l'opulence.

Ce conflit de mythes est particulièrement éclairé par les controverses dont l'extension de l'énergie nucléaire est la cause. D'un côté, les «scientifiques» et les ingénieurs, chiffres en main et lourdes démonstrations à l'appui, s'efforcent de démontrer que les risques qui pourraient résulter de l'implantation de nouvelles centrales, même en grand nombre, sont minimales. Ce faisant, ils ne tiennent aucun compte des conséquences sociales et politiques de ces implantations, notamment du type de surveillance policière qu'elles impliquent, donc des nouveaux modes de *contrôle social* ⁽⁵⁾ dont elles peuvent favoriser la mise en place. De l'autre côté, faisant écho à des frayeurs souvent mal raisonnées relatives à la diffusion de maladies étranges (dont le paradigme est «le» cancer, source d'angoisse majeure dans notre société débarrassée des grandes épidémies de jadis), les écologistes, combattant la «pollution», par les actions violentes qu'ils organisent ou qu'ils cautionnent, accélèrent la mise en place de ces nouveaux modes de contrôle social basés sur une inflation d'interventions policières. En même temps, ils proposent un modèle de communauté dont ils n'aperçoivent pas le type de contrôle social qu'elle implique, et qui répugnerait sans nul doute à la majorité des citoyens de nos pays très urbanisés.

Car le «village» rêvé, ou son homologue, le «quartier» redevenu multi-fonctionnel de villes arrachées à la spéculation immobilière et au zonage, impliquent une lisibilité des relations sociales pratiquement permanente, sous-tendant un contrôle particulièrement envahissant des uns par les autres, destiné à assurer le maintien de normes sociales et culturelles dont l'origine consensuelle est elle-même mythique. Les formes de sociabilité, pour reprendre le concept simmelien, dont la légitimité est reconnue dans le village traditionnel, diffèrent radicalement de celles qui ont cours dans les grandes agglomérations et même dans les villes de taille moyenne. Il y a quelque paradoxe à se vouloir à

(5) «Contrôle» est pris ici dans le sens qu'il a en anglais (*social control*). On entend par «contrôle social», depuis Ross (1901), le «vaste ensemble des processus et phénomènes sociaux ayant pour fonction d'assurer le maintien de l'ordre social (c'est-à-dire le maintien de l'ordre observable dans une société donnée)» (DANDURAND, Y. et RIBORDY, F. X., *Crime et Société*, Ed. de l'Université d'Ottawa, 1980, 246 pages ; p. 12).

la fois le défenseur, comme cela se produit parfois, d'un mode de vie communautaire et du respect de la vie privée contre les empiètements de l'informatique, par exemple (l'ordinateur est aussi le support de quelques mythes qui mériteraient bien une analyse à part). En effet, il n'y a peut-être de vie privée possible que parce que la dilution des relations sociales dans les grands espaces urbains, où domine une sociabilité du type «foule solitaire» (Riesman), favorise un certain anonymat propice à l'éloignement du contrôle permanent par le voisinage et les autres protagonistes du contrôle social informel.

Face aux péans qu'entonnent les technocrates convaincus d'avoir mis au point, avec les centrales nucléaires, la solution aux problèmes que fait peser sur la société – et sur l'ordre social – la menace de pénuries d'énergie, les partisans d'un ralentissement de la consommation d'énergie et d'un retour concomitant à des formes de sociabilité davantage communautaires proposent une vision utopique qui n'est pas plus «progressiste». Le mythe du progrès par l'accumulation de découvertes scientifiques et techniques – mythe, en ce sens que ce progrès est censé porter son propre procès de perfectionnement moral – se trouve opposé au mythe du rétablissement des rapports authentiques rétablis entre les habitants de petites unités d'habitat vivant dans une pauvreté relative librement assumée et compensant la réduction d'avoir par un supplément d'être. Il ne nous appartient pas de trancher entre l'une et l'autre position, ni de les renvoyer dos à dos, nous contentant de prôner un fort illusoire *statu quo*. Notre propos doit plutôt consister à indiquer quels sont les enjeux auxquels la société est confrontée en regard du conflit qui s'établit entre les deux mythes précités.

ENJEUX SOCIAUX ET STRATÉGIES D'AFFIRMATION

La précarité des approvisionnements en combustibles énergétiques et leur renchérissement considérable sont généralement considérés, on l'a rappelé, comme les causes principales de la crise actuelle. Sans doute serait-il possible de montrer que cette vision des choses n'est rien moins que satisfaisante aux yeux d'un esprit que les causalités simples déçoivent toujours. Mais restons, pour simplifier le débat, sur le plan de l'énergie. Les menaces étant repérées, il s'ensuit que l'enjeu le plus directement définissable consiste à assurer un approvisionnement convenable à la collectivité, en vue de garantir le fonctionnement de ses rouages essentiels. Mais cet enjeu est sans doute trop lisible. Le main-

lien de l'approvisionnement fait nécessairement référence à un *ordre* de consommation énergétique considéré comme normal, lui-même composante de l'ordre social global. Comme il est de coutume, la défense d'un ordre, quel qu'il soit, exclut la transparence de ses fondements et des motifs de sa conservation. L'approvisionnement est ici *fétichisé*, et le fétiche se pare des oripeaux de l'évidence. Après tout, les citoyens survivraient sans doute sans grande peine avec un approvisionnement réduit : ils se chaufferaient moins, se déplaceraient moins, consommeraient moins. Pas plus que dans d'autres domaines de la vie économique et sociale, le calcul prévisionnel, tenant compte des gains et des pertes possibles en cas de changement de scénario, n'a de toute manière pas été fait ...

Du reste, la mobilisation orchestrée par les pouvoirs pour maîtriser cet enjeu n'est pas exempte de duplicité. Il s'agit d'assurer l'approvisionnement énergétique, tout en préconisant des économies. Les pouvoirs se donnent ainsi les gants de veiller à la fois au maintien de l'état antérieur et à la compression des gaspillages. Il est vrai que la mise en œuvre de politiques visant à imposer ou encourager les économies d'énergie peut se révéler avantageuse du point de vue de l'ordre social, puisqu'elles peuvent contribuer à résorber le chômage. Citons un document officiel de la Commission des Communautés européennes :

«Dans le secteur résidentiel, les économies d'énergie seraient très favorables à l'emploi. C'est ainsi que des études française et italienne ont, par exemple, envisagé la création de 40.000 et 80.000 postes de travail selon les hypothèses (6)».

La résorption du chômage, présentée à la limite comme un effet bénéfique de la raréfaction possible des approvisionnements énergétiques (ou du moins de leur renchérissement), mène au second enjeu de l'énergie, à savoir le maintien d'un *genre* de vie inchangé dans les pays industrialisés à haut *niveau* de vie. Les vives controverses qui se produisent au sujet de l'énergie nucléaire comportent souvent des affirmations de ce genre : «si l'on veut continuer à vivre comme avant, il faut accepter les risques éventuels de l'extension du nucléaire ; les gens doivent savoir ce qu'ils veulent». Bien mauvais esprit qui trouverait là quelque relent de chantage ...

(6) *Le dossier de l'Europe* : «Investir pour économiser l'énergie», Commission des Communautés Européennes, novembre 1981, p. 2.

En dépit du discours lénifiant des «spécialistes», scientifiques sincères ou technocrates stipendés, il est évident que des risques matériels, quelques incidents récents l'ont démontré, existent bel et bien. Qu'ils soient amplifiés dans les représentations collectives, au départ d'une information difficilement assimilable et déjà manipulée, cela ne peut être nié. Il arrive même qu'on attribue au «nucléaire» tous les accidents de pollution grave survenus récemment (7). Mais il apparaît bien que, par ignorance des plus compétents même, l'ampleur des risques maximaux n'ait pas encore pu être calculée. On s'en tient généralement à un probabilisme qui se veut rassurant. Il y a peu de chances que, soit. Mais il y en a quand même.

Mon propos ne peut cependant être d'engager la discussion sur ces risques-là. Comme je l'ai souligné plus haut, les partisans du nucléaire négligent généralement (ou feignent de négliger) les risques sociaux que ce mode de production d'énergie implique. Le nucléaire, outre qu'il représente une insécurité matérielle, constitue aussi une «insécurité sociale». Il s'agit avant tout des risques que présente le vol de matières radioactives et leur diffusion, à des fins criminelles, dans divers milieux habités ; également la négligence concernant l'éloignement satisfaisant des déchets ; et encore le danger d'invasion de centrales par des groupes d'opposants au nucléaire, au sein desquels des agitateurs nihilistes pourraient trouver un terrain favorable à leur action. Dans chacune de ces hypothèses, la parade consiste à mettre en place des moyens de protection accrus, lesquels fournissent ainsi aux forces policières un nouveau domaine d'élection de leur main-mise croissante, avec tous les modes de contrôle dérivés que cela comporte : fichage informatisé des individus estimés dangereux, alimentation par voie de propagande d'une angoisse sociale liée à la perception (déformée) de ces risques, limitation des droits de grève et d'intervention syndicale dans les centrales, etc.

L'enjeu est ici le maintien d'un niveau acceptable de contrôle social formel. Notons que ce contrôle formel s'associe au contrôle informel (en voie partielle de formalisation) portant sur les gaspillages d'énergie. Le thème de l'énergie, comme celui de la santé publique, celui de la communication, celui de la culture, fournit l'occasion aux pouvoirs de

(7) Lors d'un examen, plusieurs étudiants de la licence en journalisme de l'U.L.B. ont donné la pollution survenue à Seveso par suite de la diffusion dans l'atmosphère d'un produit toxique pour un accident «nucléaire».

mettre en place de nouvelles structures de contrôle social, pouvant se traduire par un «quadrillage» accru de la population. Quadrillage militaire d'abord : les centrales, les voies de communication qui y mènent, leurs abords, les ports où l'on embarque les déchets, les véhicules transportant ces déchets et les combustibles, etc. doivent être protégés, et les personnes ayant accès aux centrales et aux installations connexes doivent pouvoir être «filtrées» efficacement. Quadrillage symbolique ensuite : tous les moyens de persuasion doivent être mis en œuvre pour légitimer l'implantation des centrales (aux endroits choisis) et les protections spéciales qu'elles requièrent. Il faudra faire appel pour cela à la Science, considérée comme univers symbolique davantage que comme théorie explicite (à la portée d'une infime minorité seulement), voire à une vision du monde totalisante reposant sur l'exaltation des «valeurs» occidentales de progrès, de bien-être, de liberté, hyper-fétichisées pour la circonstance.

A cette jointure entre le quadrillage militaire et le quadrillage symbolique apparaît un nouvel enjeu, à savoir celui de l'information correcte sur les objets scientifiques ou technologiques. La presse spécialisée est peu lue, et pour cause, dans la mesure où elle réclame une «base» de connaissances que bien peu possèdent. Restent la grande presse, la radio et la télévision. L'une des ruses volontiers utilisée par les pouvoirs (je recours à ce vague pluriel tout à fait à dessein : lui donne vie qui veut, et sous les espèces qui ont sa préférence) est de prétendre à l'objectivité par l'organisation de *débats*. Cette dangereuse manie des *mass media*, soit dit en passant, est sans doute à l'origine de la *déculturnation* croissante de la majorité des mass-médiamanes, des téléspectateurs en particulier. Le refus de l'exposé didactique, l'infantilisation des présentations, engendrent une ignorance qui se réclame volontiers de la démocratisation des idées et des connaissances. Le domaine de l'énergie, comme celui de la médecine, par exemple, ne laisse pas d'être assez privilégié à cet égard. La maîtrise de cet enjeu est cependant capital, notamment dans ses rapports avec l'enjeu de la maîtrise des risques matériels et surtout sociaux que représente l'implantation de centrales nucléaires ou le recours intensifié à des sources d'énergie mettant gravement en cause la conservation de cadres de vie agréables.

Nous pouvons, à ce stade, embrayer sur un autre enjeu, dont la formulation revêt une forte connotation rhétorique. Il s'agit de la *qualité de la vie*. On connaît la vogue qu'a connue récemment cette formule, devenue une manière de slogan dont se réclament diverses

formations politiques, situées à l'un ou l'autre bord de l'échiquier des partis. On a même vu, par des partis de gauche, la récupération de l'apostrophe rimbaldienne : «Changer la vie». La qualité de la vie désigne, en fait, une modification du genre de vie actuel dans le sens d'un allègement du stress, d'une meilleure disposition de son temps libre, d'une meilleure intégration des exigences du corps dans les modes de production et de consommation, d'une participation accrue à la création culturelle (par la mise en valeur de cette faculté-miracle, tarte à la crème de l'animation «socio-culturelle», la «créativité»), d'un rétablissement de la dimension communautaire (*Gemeinschaftlich*) dans les rapports sociaux, et bien d'autres choses encore. Il existe un paradigme de la qualité de la vie qui comporte notamment la réduction des gaspillages de tous ordres. Mais, dans l'esprit des publicitaires, ce slogan ne prend son sens que par rapport au maintien d'une économie d'abondance et de plein emploi. C'est-à-dire du maintien d'un niveau optimal de consommation d'énergie.

Le mot d'ordre de la qualité de la vie est forcément ambigu. On y trouve à la fois, selon les milieux qui le profèrent, de la nostalgie pour le mythique «âge d'or» et de l'aspiration vers la «bonne vie», dont les «avant-guerres» seraient le symbole. L'utilisation de ce mot d'ordre à des fins de propagande, de publicité, ou de légitimation d'un discours pseudo-scientifique (du genre «sociologie des loisirs») peut être illustrée de multiples façons. Il va de soi que les fabricants d'énergie ne manquent pas d'y avoir recours, entre autres ceux qu'on appelle les «électriciens».

L'ÉNERGIE, UN ANALYSEUR

Les promoteurs de l'*analyse institutionnelle* (Louran, Lapassade), qui connut naguère, notamment avec l'affaire Lip⁽⁹⁾, son heure de gloire, ont utilisé le terme d'*analyseur* pour désigner un accident historique à propos duquel se révèlent les conflits fondamentaux d'une société et, dirions-nous, les enjeux par rapport auxquels elle est contrainte de se déterminer. Il semble bien évident que la crise de l'énergie constitue un analyseur particulièrement efficace. Autour d'elle se manifestent des

(9) V. pour une présentation simple du concept le livre de René LOURAU, *L'analyseur Lip*, Paris, U.G.E., Coll. 10/18, 1974, 187 pages.

contradictions que l'exaltation de la croissance continue et de l'*affluent society* avait occultées.

Une première contradiction se situe au cœur même de la société de bien-être (ou d'abondance, ou de consommation, *ad libitum* ...). D'un côté, le maintien de la croissance économique, que la mise en service de nouvelles sources d'énergie devrait garantir, doit contribuer, selon les discours de ses thuriféraires, à réduire les inégalités sociales, à aplanir les conflits entre les classes sociales, qui mettent en péril un ordre social harmonieux et démocratique. De l'autre, cette abondance même engendre de nouvelles aliénations, qui entraînent de nombreux citoyens dans une situation de semi-anomie, comportant le refus de la participation aux affaires publiques et le retrait dans la sphère privée, où des rapports privilégiés ne s'établissent qu'avec un nombre très réduit de proches.

La mise en cause de ces nouvelles aliénations passe, pour certains groupes (généralement réunis sous l'appellation d'«écologistes»), par la contestation des nouvelles sources d'énergie, dans la mesure où elles participent à un programme de poursuite ou de rétablissement de la société d'avant la crise, celle de la foule solitaire et du primat de l'avoir sur l'être⁽⁹⁾. L'attention attirée sur des énergies dites «alternatives» (la langue française ne sort pas grandie de ces conflits !) est l'un des moyens choisis pour rompre avec cet état d'aliénation, dans la mesure où elles représentent une incitation à l'imagination collective – génératrice, du moins le prétend-on, de nouveaux modes de solidarité – et une irruption de la «nature» (le soleil, le vent, les matières organiques) dans un univers uniquement dominé par le technologique.

Le thème des nouvelles énergies s'inscrit dans un paradigme de l'«alternatif», dont il est l'une des figures dominantes et, en quelque sorte, le symbole. L'utilisation du vent et du soleil, producteurs d'énergie disponibles si l'en est, réintroduit dans le débat des éléments d'une lisibilité quasi absolue, en opposition radicale avec le mystère des réactions en chaîne au sein d'un réacteur atomique. Il ne s'agit évidemment que d'une simplicité apparente, car la transformation de la lumière solaire ou de la force du vent en énergie utilisable réclame elle-même des appareillages fort sophistiqués, dont la description et l'explication ne sont pas à la portée du premier «écologiste» venu. Quant à la géothermie, l'énergie marémotrice, pour ne prendre que ces deux

(9) Ce thème a été très brillamment illustré par le roman de Georges PEREC, *Les Choses*, Prix Renaudot 1965.

exemples supplémentaires, leur utilisation exige des installations qui ne peuvent certainement pas être érigées dans un cadre domestique.

Une seconde contradiction se révèle entre un savoir scientifique «encombrant», lié à une technologie lourde et génératrice d'aliénation culturelle, et un savoir scientifique «léger» (je dirais volontiers «portatif»), lié à une technologie aisée à manier et génératrice, pense-t-on, de libération culturelle. A la limite, ce savoir non aliénant apparaît comme un contre-savoir, qui s'inscrirait assez volontiers dans le paradigme de l'anti-science. La contestation du nucléaire rejoint souvent dans un même mouvement d'opposition celle du savoir académique, de la médecine clinique, des sciences humaines, des tests et des sondages d'opinion.

Au vrai, à une menace imprécise, qui se pare parfois de couleurs apocalyptiques, se trouve opposé un savoir diffus, à vocation affirmée d'antipositivisme, fortement tenté par l'exaltation utopique. Une société délivrée du danger nucléaire pourrait être une société où les pratiques sociales sont à nouveau teintées d'affectivité, où les structures sont considérablement assouplies, qu'il s'agisse des hiérarchies ou des horaires, où la technique est ramenée à quelques savoir-faire de type artisanal. Illitch a connoté une telle société de son mot d'ordre de «convivialité». En réponse aux simplifications des technocrates, on trouve un bric-à-brac idéologique («l'utopie ou la mort», écrira René Dumont) qui n'est certainement pas parvenu à se prémunir contre tout danger de «récupération». Quel club de vacances ne s'afficherait pas «convivial» de nos jours, à la manière des partis politiques de vieille et morne souche qui s'affirment maintenant partisans de «changer la vie» ?

Le débat énergétique sert en premier lieu d'analyseur des contradictions de l'écologisme. Si les chantres du nucléaire nous font volontiers miroiter un avenir dans lequel n'entrent ni la fantaisie, ni la liberté de dévier par rapport à des normes dictées par le calcul et l'esprit du profit, les écologistes nous proposent de manière assez confuse une utopie ruraliste dont les aspects passéistes ne devraient pas être minimisés. D'un côté, un contrôle social *formel* accru, de l'autre, le retour à des formes sensiblement plus pesantes de contrôle social *informel*. La troisième contradiction ne se situe-t-elle pas dans l'occultation, qu'il s'agisse de l'un ou de l'autre discours, des conséquences sociales prévisibles de chacune des positions antagonistes ?

En effet, l'une et l'autre de ces positions prétendent nous renseigner sur les enjeux fondamentaux d'une société confrontée à une crise

importante. Mais, tandis que l'une se noie dans ses calculs de risques, dans ses prévisions de rentabilité, l'autre se perd dans des incantations utopiques. Les enjeux fondamentaux se trouvent ainsi escamotés. Les partisans de l'une et de l'autre position se regardent en chiens de faïence, et échangent arguments sans finesse et injures. Il arrive aussi qu'on en arrive aux mains, comme à Creys-Malville ou aux abords de maintes centrales allemandes. Mais, dans ce débat, la réflexion sur l'histoire fait défaut, sinon sous les espèces outrageusement réduites de slogans :

«Au début de la machine à vapeur, on a connu les mêmes peurs et on a assisté aux mêmes manifestations : la suite a bien démontré que ceux qui avaient peur de cette nouvelle énergie étaient dans l'erreur» ;
«L'humanité va de suicide en suicide ; après Verdun, Hiroshima ; l'étape suivante sera la dernière : l'excès de technologie engendra la destruction de toute civilisation, faute d'avoir pu contrôler les démons libérés par l'ouverture de la boîte de Pandore».

Il ne n'appartient certainement pas ici d'indiquer comment ces contradictions pourraient être surmontées. Existe-t-il une voie moyenne ? S'agit-il seulement de prendre conscience de ces contradictions, pour poser clairement les vrais enjeux, et chercher un consensus autour de leurs solutions possibles ? Le déroulement de l'histoire (qui n'est jamais qu'une somme d'histoires) ne répond pas à des scénarios simples. Les technocrates ne peuvent pas planifier son cours, pas davantage que les écologistes ne peuvent le conjurer par des formules incantatoires. Sans doute importe-t-il d'abord de voir qu'il s'agit de choisir entre diverses valeurs, dont aucune ne peut être ramenée à un fétiche ou à un simple prédicat. Les valeurs résultent des actions des hommes autant qu'elles les inspirent. Ce mouvement circulaire, du reste, ne possède pas qu'un seul centre. Il faut veiller, à tout le moins, à préserver la possibilité de controverses, fussent-elles chargées d'invectives. Cela ne peut être que si tous les aspects du problème peuvent être présentés sur la place publique, si le débat ne se trouve pas a priori enserré entre deux pôles qui ne sont peut-être pas les plus importants. C'est dialectiquement que les choses prennent le cours qu'elles prennent. Il est temps de laisser la parole à la dialectique.

Sommaire

<u>andré jaumotte</u>	l'université et les problèmes de l'énergie	3
<u>jean michot</u>	la licence spéciale interfacultaire en sciences, techniques et gestion de l'énergie	13
<u>jacques bougard</u>	possibilités et limites de l'énergie solaire	19
<u>émile vander donckt</u>	le photovoltaïsme	27
<u>rené cyprès</u>	valorisation chimique du charbon	31
<u>bruno schmitz</u>	l'énergie de la biomasse	47
<u>bernard leduc</u>	l'énergie totale, un exemple : le totem	69
<u>jacques devooght</u>	les risques et les coûts sociaux associés à la production d'énergie : problèmes actuels	91
<u>yvan guillaume</u>	la politique énergétique dans le contexte économique actuel	109
<u>rené jottrand et éric tomas</u>	l'analyse des processus industriels et la comptabilité énergétique	125
<u>g. karnas, p. salengros, g. beausire et a. tomberg</u>	psychologie et énergie : une approche des représentations en matière d'économies d'énergie	137
<u>claudes javeau</u>	l'énergie : un enjeu et un mythe	149

L'énergie aujourd'hui

andré jaumotte	l'université et les problèmes de l'énergie
jean michot	la licence spéciale interfacultaire en sciences, techniques et gestion de l'énergie
jacques bougard	possibilités et limites de l'énergie solaire
émile vander donckt	le photovoltaïsme
rené cyprès	valorisation chimique du charbon
bruno schmitz	l'énergie de la biomasse
bernard leduc	l'énergie totale, un exemple : le totem
jacques devooght	les risques et les coûts sociaux associés à la production d'énergie : problèmes actuels
yvan guillaume	la politique énergétique dans le contexte économique actuel
rené jottrand et éric tomas	l'analyse des processus industriels et la comptabilité énergétique
g. karnas, p. salengros, g. beausire et a. tomberg	psychologie et énergie : une approche des représentations en matière d'économies d'énergie
claudé javeau	l'énergie : un enjeu et un mythe

Règles d'utilisation de copies numériques d'œuvres littéraires publiées par l'Université libre de Bruxelles et mises à disposition par les Archives & Bibliothèques de l'ULB

L'usage des copies numériques d'œuvres littéraires, ci-après dénommées « copies numériques », publiées par l'Université Libre de Bruxelles, ci-après ULB, et mises à disposition par les Archives & Bibliothèques de l'ULB, ci-après A&B, implique un certain nombre de règles de bonne conduite, précisées ici. Celles-ci sont reproduites sur la dernière page de chaque copie numérique mise en ligne par les A&B. Elles s'articulent selon les trois axes : protection, utilisation et reproduction.

Protection

1. Droits d'auteur

La première page de chaque copie numérique indique les droits d'auteur d'application sur l'œuvre littéraire.

2. Responsabilité

Malgré les efforts consentis pour garantir les meilleures qualité et accessibilité des copies numériques, certaines déficiences peuvent y subsister – telles, mais non limitées à, des incomplétudes, des erreurs dans les fichiers, un défaut empêchant l'accès au document, etc. -. Les A&B déclinent toute responsabilité concernant les dommages, coûts et dépenses, y compris des honoraires légaux, entraînés par l'accès et/ou l'utilisation des copies numériques. De plus, les A&B ne pourront être mises en cause dans l'exploitation subséquente des copies numériques ; et la dénomination des 'Archives & Bibliothèques de l'ULB' et de l'ULB, ne pourra être ni utilisée, ni ternie, au prétexte d'utiliser des copies numériques mises à disposition par eux.

3. Localisation

Chaque copie numérique dispose d'un URL (uniform resource locator) stable de la forme <http://digistore.bib.ulb.ac.be/annee/nom_du_fichier.pdf> qui permet d'accéder au document ; l'adresse physique ou logique des fichiers étant elle sujette à modifications sans préavis. Les A&B encouragent les utilisateurs à utiliser cet URL lorsqu'ils souhaitent faire référence à une copie numérique.

Utilisation

4. Gratuité

Les A&B mettent gratuitement à la disposition du public les copies numériques d'œuvres littéraires publiées par l'ULB : aucune rémunération ne peut être réclamée par des tiers ni pour leur consultation, ni au prétexte du droit d'auteur.

5. Buts poursuivis

Les copies numériques peuvent être utilisés à des fins de recherche, d'enseignement ou à usage privé. Quiconque souhaitant utiliser les copies numériques à d'autres fins et/ou les distribuer contre rémunération est tenu d'en demander l'autorisation aux Archives & Bibliothèques de l'ULB, en joignant à sa requête, l'auteur, le titre, et l'éditeur du (ou des) document(s) concerné(s).

Demande à adresser au Directeur de la Bibliothèque électronique et Collections Spéciales, Archives & Bibliothèques CP 180, Université Libre de Bruxelles, Avenue Franklin Roosevelt 50, B-1050 Bruxelles.
Courriel : bibdir@ulb.ac.be.

6. Citation

Pour toutes les utilisations autorisées, l'utilisateur s'engage à citer dans son travail, les documents utilisés, par la mention « Université Libre de Bruxelles – Archives & Bibliothèques » accompagnée des précisions indispensables à l'identification des documents (auteur, titre, date et lieu d'édition).

7. Liens profonds

Les liens profonds, donnant directement accès à une copie numérique particulière, sont autorisés si les conditions suivantes sont respectées :

- a) les sites pointant vers ces documents doivent clairement informer leurs utilisateurs qu'ils y ont accès via le site web des Archives & Bibliothèques de l'ULB ;
- b) l'utilisateur, cliquant un de ces liens profonds, devra voir le document s'ouvrir dans une nouvelle fenêtre ; cette action pourra être accompagnée de l'avertissement 'Vous accédez à un document du site web des Archives & Bibliothèques de l'ULB'.

Reproduction

8. Sous format électronique

Pour toutes les utilisations autorisées mentionnées dans ce règlement le téléchargement, la copie et le stockage des copies numériques sont permis ; à l'exception du dépôt dans une autre *base de données*, qui est interdit.

9. Sur support papier

Pour toutes les utilisations autorisées mentionnées dans ce règlement les fac-similés exacts, les impressions et les photocopies, ainsi que le copié/collé (lorsque le document est au format texte) sont permis.

10. Références

Quel que soit le support de reproduction, la suppression des références à l'ULB et aux Archives & Bibliothèques de l'ULB dans les copies numériques est interdite.