

Le courrier du CNRS Energie

Auteur(s) : CNRS

Les folios

En passant la souris sur une vignette, le titre de l'image apparaît.

56 Fichier(s)

Les relations du document

Ce document n'a pas de relation indiquée avec un autre document du projet.□

Citer cette page

CNRS, Le courrier du CNRS Energie

Valérie Burgos, Comité pour l'histoire du CNRS & Projet EMAN (UMR Thalim, CNRS-Sorbonne Nouvelle-ENS)

Consulté le 12/01/2026 sur la plate-forme EMAN :

<https://eman-archives.org/ComiteHistoireCNRS/items/show/263>

Présentation

Mentions légalesFiche : Comité pour l'histoire du CNRS ; projet EMAN Thalim (CNRS-ENS-Sorbonne nouvelle). Licence Creative Commons Attribution - Partage à l'Identique 3.0 (CC BY-SA 3.0 FR).

Editeur de la ficheValérie Burgos, Comité pour l'histoire du CNRS & Projet EMAN (UMR Thalim, CNRS-Sorbonne Nouvelle-ENS)

Information générales

LangueFrançais

CollationA4

Informations éditoriales

N° ISSN0153-985x

Notice créée par [Richard Walter](#) Notice créée le 20/10/2024 Dernière modification le 13/12/2024

LE COUP D'ÉTAT DU CNRS

Spécial énergie

CNRS
Départ des archives
de la Délégation Paris Michel-Ange
Bâtiment 19
1, avenue de la Terrasse
91198 GIF-sur-Yvette



NUMERO SPECIAL • ENERGIE • - JUIN 1975 • 10 F

CNRS
Délégation du Siège
Logistique
Département d'avenir - Bâtiment 19
1, rue Descartes - la Terrasse
91190 Gif-sur-Yvette
Tél. 01 69 82 39 17

- 3 Avant propos par Bernard P. Grégoire
- 4 Ouverture de la journée par Jean-Pierre Soisson - Jean Blancart
- 5 Recherche fondamentale et énergie par Jean Lagasse

I - RECUPERATION ET VALORISATION DE L'ENERGIE

- 79 Valorisation du carbone par Henry Brusset
- 12 Matériaux dilués et recyclages par Pierre Blazy
- 17 Adaptation et optimisation des grandes réactions chimiques industrielles par Jacques Metzger
- 22 Optimisation de l'utilisation des polymères solides par Georges Vallet
- 24 Thermodynamique et énergétique par Marcel Barrère

II - PRODUCTION ET STOCKAGE DE L'ENERGIE

- 28 Fission et fusion par Jules Horowitz
- 31 L'hydrogène par Paul Hagenmuller
- 35 L'énergie électrochimique par Guy Bronzel
- 40 La photovoltaïque par Jean Joussot-Dubien

III - ETUDE ECONOMIQUE ET ENERGIE

- 42 Exposé de Edmond Lise

IV - SYNTHESE DES DEBATS

- 47 Avec la participation de M. Soisson, Secrétaire d'Etat aux universités ;
M. Curien, Délégué Général à la recherche scientifique et technique ;
M. Doumenec, Président du comité des relations industrielles du C.N.R.S. et
M. Chabhal, Directeur scientifique du C.N.R.S. pour le secteur de la physique.

V - ANNEXE

Numéro spécial du Courrier du CNRS : Energie - Juin 1975
Centre national de la recherche scientifique
15, quai Anatole France - 75007 Paris - tél. 555.92.25
Directeur de la publication : René Audé
Maquette Industrie Service - Réalisation ALLPRINT - Paris - 359.04.77

Photo 1 de couverture :
L'un des 63 miroirs plans orientés et sa lunette de guidage.
Photo 4 de couverture :
Couches géothermiques à Wairaki (Nouvelle Zélande).

Avant-propos

« L'ampleur de la crise de l'énergie et les conséquences qu'elle entraîne pour l'économie nationale ont incité le centre national de la recherche scientifique à accentuer, depuis plusieurs mois, son effort dans le domaine des recherches sur l'énergie. »

Cette action s'est développée autour des trois axes suivants :

- *procéder au bilan des travaux menés par les laboratoires et formations du C.N.R.S. dans les domaines liés plus ou moins directement aux problèmes énergétiques.*
- *assurer une étroite corrélation entre les actions entreprises par le C.N.R.S. et celles menées par d'autres organismes, notamment les actions concertées mises en place par la D.G.R.S.T.*
- *entreprendre, en s'appuyant en particulier sur les laboratoires de sciences pour l'ingénieur du C.N.R.S., une action de réflexion et de prospective sur le thème « Energie », en liaison étroite avec le secteur socio-économique. Cette action visait notamment à conforter et à élargir les travaux qui avaient été conduits en 1973 pour l'établissement du rapport national de conjoncture scientifique.*

C'est ainsi que, dès février 1974, ont été constitués une quinzaine de « groupes de réflexion et de prospective » comportant pour une part égale des représentants des milieux scientifiques et économiques. Près de 400 personnalités ont ainsi participé aux réunions des groupes de travail qui se sont tenues de février à octobre et dont les objectifs essentiels étaient, en visant le long terme, d'effectuer une réflexion en profondeur sur les thèmes de recherche fondamentale qu'il peut apparaître nécessaire de développer, notamment parce qu'ils représentent des facteurs limitants pour la recherche de type industriel ou pour le développement des techniques et des technologies dans le domaine de l'Energie.

La journée d'étude du 18 décembre 1974 a constitué la première manifestation organisée par le C.N.R.S. pour faire connaître les résultats de ces travaux sur les thèmes de recherche fondamentale liés aux problèmes de l'énergie et les conclusions des rapports des groupes qui ont pu être ainsi largement débattues. Parmi les objectifs de cette opération, le C.N.R.S. vise notamment à sensibiliser, à l'intérieur de ses laboratoires comme à l'extérieur, des chercheurs et ingénieurs susceptibles de s'intéresser au programme de recherches qui résultera, en définitive, des conclusions des travaux des groupes.

C'est également le but de ce numéro spécial du « Courrier » qui rapporte notamment les interventions des animateurs des groupes de réflexion et de prospective lors de la journée du 18 décembre, et dont le sommaire montre la diversité et la richesse des exposés dont chacun d'eux a été suivi de nombreuses interventions.

Bernard P. GREGORY

Ouverture de la journée

Au début de l'année, il a été demandé à l'ensemble des organismes de recherche de faire un effort particulier pour limiter les conséquences de la crise sur l'économie nationale et l'un des premiers, le C.N.R.S., a répondu à cet appel en liaison étroite avec ce qui était, à l'époque, la direction générale des enseignements supérieurs et de la recherche du ministère de l'éducation nationale. Une action de sensibilisation a été lancée auprès des différents chercheurs. Dès la réorganisation du gouvernement, j'ai confirmé cette orientation, et aujourd'hui le C.N.R.S. a tenu à procéder au bilan des travaux menés par ses laboratoires et par ses formations dans les domaines qui sont plus ou moins liés aux problèmes de l'énergie. Il a fallu, pour cela, entreprendre une action de réflexion en liaison avec les représentants du monde économique et du monde industriel, et c'est la raison pour laquelle je salue avec

un plaisir particulier les représentants des grandes industries françaises présents dans cette salle. Le C.N.R.S. a tenu à vérifier en outre la coordination entre les travaux qu'il poursuit et l'ensemble des actions menées par la délégation générale à la recherche scientifique et technique, et je suis heureux de saluer également M. Curien. Voici, qu'aujourd'hui, le C.N.R.S. fait publiquement connaître les résultats des travaux des quinze groupes de réflexion et de prospective qui ont été créés en février 1974. J'ai tenu à ouvrir cette séance, non seulement pour exprimer ma satisfaction de voir ainsi le C.N.R.S. contribuer à la solution d'un difficile problème pour notre économie, mais aussi pour montrer toute l'importance que le gouvernement attache aux problèmes de l'énergie.

Monsieur le directeur général, Messieurs, votre programme de la journée est extrêmement chargé, et je ne pourrai

suivre personnellement tous vos travaux, mais je reviendrai en fin d'après-midi m'efforcer d'en faire la synthèse avec vous.

Je tiens aussi à dire combien j'apprécie que M. Doumenc et M. Curien préparent cette séance de travail, car ce choix démontre, s'il était besoin, l'ouverture du C.N.R.S. aux problèmes de notre pays et montre que l'évolution que sa direction a voulu donner à cet organisme est d'ores et déjà une réussite.

Je vous souhaite et je nous souhaite bon travail, pour que cette journée de réflexions marque une étape importante dans nos travaux de recherche et qu'elle soit bénéfique pour les différents participants qui ont bien voulu y assister.

Jean-Pierre SOISSON

Secrétaire d'Etat aux universités.

M. Biancard souligne en premier lieu que sa présence constitue un témoignage de l'intérêt qu'il porte aux travaux de réflexion du C.N.R.S. dans le domaine des recherches liées à l'énergie et aux documents qui ont été diffusés pour la journée d'étude du 18 décembre.

Il appelle d'autre part l'attention sur la brutalité de la crise de l'énergie due à la brusque augmentation des prix du pétrole ce qui a rendu toute riposte rapide difficile, notamment en tenant compte de l'inertie naturelle de l'industrie concernée.

Cette rapidité constituait évidemment un atout important des pays producteurs de pétrole qui prenaient ainsi à contre pied une société qui, depuis quinze années, avait connu sans préoccupation majeure, un développement assez extraordinaire.

M. Biancard s'interroge également sur la durée de la crise et, sans vouloir jouer au prophète, émet l'avis que sa durée sera longue et qu'il faut, par conséquent, adopter une stratégie tenant compte de cette donnée.

En tout état de cause, il estime qu'il ne faut pas miser sur une baisse des prix du pétrole qui pourrait faire penser que toutes les mesures à prendre maintenant pourraient, un jour prochain, s'aviser inopportunnes.

Il en déduit alors « que les travaux du C.N.R.S. qui sont fatallement à plus long terme que nos problèmes immédiats ont une grande valeur puisqu'avec une énergie et des matières premières chères, il faut se préparer à une situation tout à fait différente ».

A cet égard d'ailleurs il souligne un point qu'il a noté dans les documents du C.N.R.S., celui concernant le projet d'étude sur le « modèle d'une société avancée à bas profil énergétique » et les conditions qu'il faudrait remplir et le prix qu'il faudrait payer pour se rapprocher d'un tel modèle.

M. Biancard commente ensuite deux des thèmes qui ont été traités par les groupes de réflexion et de prospective du C.N.R.S. en soulignant que son choix ne doit pas être considéré comme un « essai de palmarès ».

Il traite ainsi que la « synthèse de combustibles et de la chimie du méthane » et du « recyclage et de l'enrichissement des matières premières » pour insister sur l'intérêt que présentent de telles études et mettre en avant quelques orientations particulières que pourraient prendre les recherches dans ces domaines : études de systèmes économiques permettant de transformer le gaz naturel en produits liquides dans le premier cas et méthodes de traitement de minéraux à faible teneur dans le deuxième.

M. Biancard exprime enfin quelques considérations sur ce que « l'on appelle sans doute improprement, les énergies nouvelles, pour les uns la géothermie, pour d'autres le solaire, pour d'autres enfin l'hydrogène... ». Il souhaite que l'on réfléchisse bien avant de lancer des investissements qui pourraient s'avérer, à cet égard, extrêmement coûteux sans pour autant qu'à terme on retrouve les intérêts escomptés. Pour la géothermie, par exemple, il compare les économies de pétrole qui peuvent être faites par l'exploitation de ces ressources nouvelles à la consommation globale que l'on peut estimer vers les années 1985.

Il est cependant conscient que c'est bien dans le rôle de la recherche de réfléchir à toutes les solutions possibles qu'il convient de ne pas exclure a priori mais sans non plus penser qu'elles puissent constituer des panacées.

Il conclut enfin en souhaitant que se développent entre la délégation générale à la recherche scientifique et technique, le C.N.R.S. et la délégation générale à l'énergie, les courants d'échanges nécessaires afin que, dans cette crise que tout laisse prévoir de longue durée, on puisse mettre toutes les qualités de nos cervaux au service de l'approvisionnement énergétique de notre pays dans l'optique d'une meilleure sécurité, d'une meilleure qualité et à moindre coût.

Introduction à la journée recherche fondamentale énergie

« Je me souviens que l'abbé Barthélémy me tourna en ridicule une fois que, par hasard, je prononçai ce mot énergie : eh bien ! qu'il sache qu'aujourd'hui il est devenu à la mode et qu'on n'écrira plus rien qu'on ne le place... », ainsi s'exprimait - en 1779 - Madame Du Deffand dans une lettre à la duchesse De Choiseul.

Le caractère encore très actuel de cette citation m'incitait - vous en conviendrez - à la placer en tête de cette journée où le C.N.R.S. a convié divers responsables des secteurs publics ou privés, des journalistes spécialisés et des représentants de ses laboratoires à venir participer à un débat - que nous espérons largement ouvert - sur les thèmes des recherches fondamentales liés à l'énergie.

Il n'est certainement pas inutile de rappeler que la mission confiée au C.N.R.S. est de développer, d'orienter et de coordonner la recherche scientifique, son principal effort étant dirigé vers ce que l'on convient d'appeler, en France comme à l'étranger, la recherche fondamentale orientée ou recherche de base. Cette mission du C.N.R.S. s'appuie sur deux éléments essentiels :

- d'une part il crée, organise et gère des laboratoires universitaires,
- d'autre part, il encourage des actions de recherches communes entre laboratoires par le canal de recherches coopératives sur programmes et d'actions thématiques programmées sur des axes de recherche qui bénéficient d'une priorité, celle-ci étant définie par exemple - dans le cadre du Plan.

Retenons surtout de ce bref exposé limitatoire que l'action du C.N.R.S. s'exerce essentiellement dans le domaine de la recherche fondamentale dont il est re-

connu qu'elle vise plus particulièrement des objectifs à long terme. Cette « profession de foi » pourrait dès l'abord décevoir certains, pour qui le long terme n'est pas toujours susceptible de faire l'objet des « feux de la rampe ». Une telle position méconnaîtrait - à mon sens - quelques éléments que je me permettrai de résumer :

- d'abord que la recherche fondamentale que ce soit en science d'analyse ou en science pour l'ingénieur, par l'approfondissement des connaissances qu'elle implique, peut directement agir sur les facteurs limitants pour la recherche de type industriel ou pour le développement des techniques. Elle peut, de plus, constituer un recours face aux points de butée que peut rencontrer l'accélération ou le changement des technologies, voire même s'imposer en garantie devant les dangers que ces derniers peuvent faire courir à l'environnement ou, plus généralement, à la qualité de la vie.
- ensuite parce que le développement de la recherche fondamentale représente probablement l'une des assurances à laquelle tout gouvernement se doit de souscrire s'il veut, à terme, bénéficier d'une variété de choix techniques et technologiques et partant de la possibilité de maîtriser réellement une politique.
- enfin parce que le C.N.R.S. dans le choix de ses orientations s'est efforcé et s'efforce de faire preuve de lucidité et de réalisme, notamment en tenant compte pour la définition et la priorité des thèmes de recherches, des motivations socio-économiques définies par les organismes compétents, des chances françaises dans le domaine et des retombées

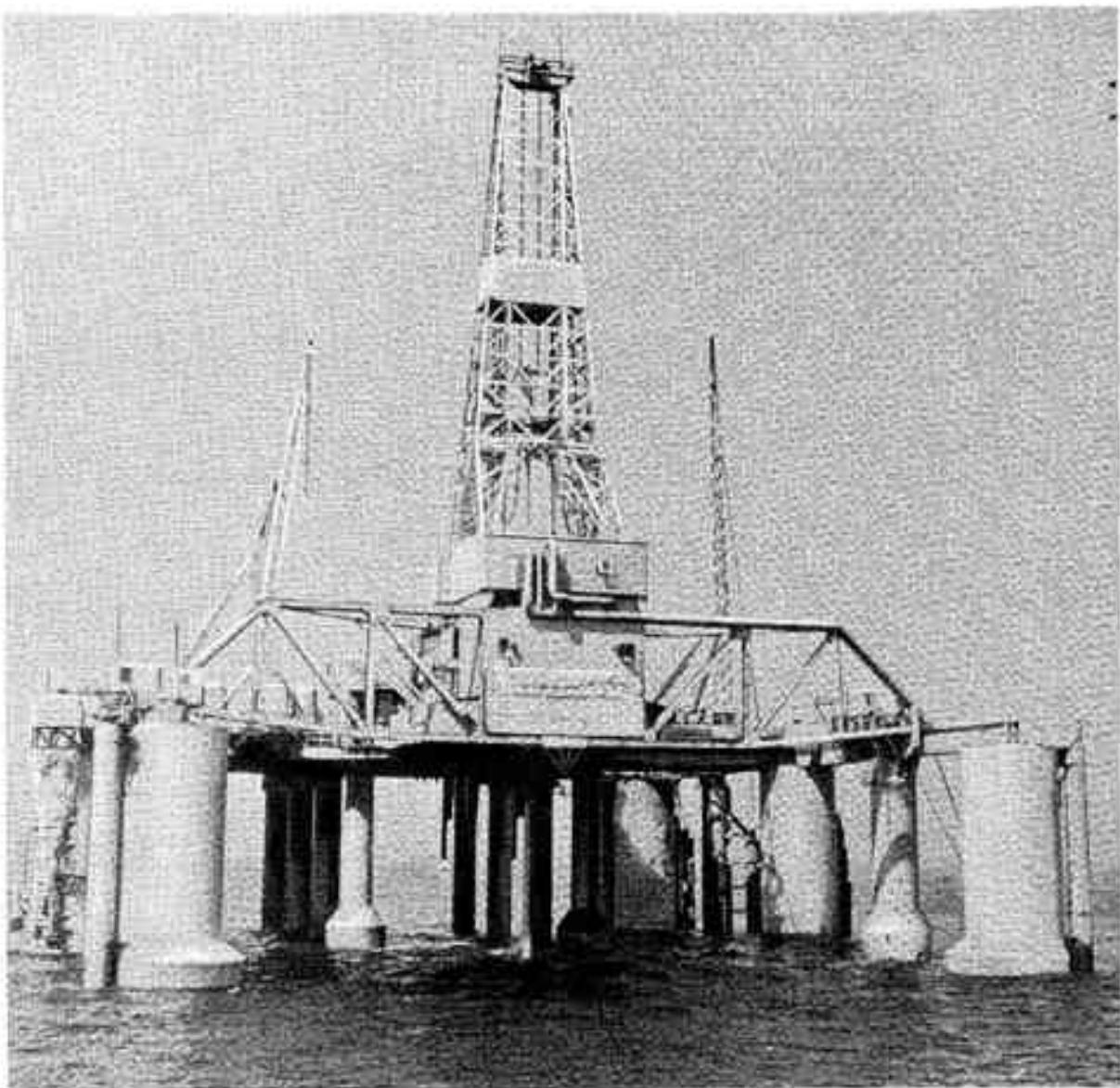
que l'on peut attendre à moyen terme des travaux entrepris.

Placé face à la crise de l'Energie et prenant sa mission à la lettre, le C.N.R.S. eût pu se contenter de procéder à un bilan des travaux de ses laboratoires menés dans les domaines liés à l'énergie et d'accentuer dans son action d'orientation et d'incitation ceux des thèmes, qui dans ces domaines, lui paraissaient susceptibles de bénéficier d'une certaine priorité.

C'est d'ailleurs - dans un premier temps et sans attendre le plus fort de la crise - ce qu'il a fait dans le cadre de la mission que lui confie le Gouvernement d'établir régulièrement le « rapport national de conjoncture scientifique ». Celui-ci a été préparé pendant l'année 1973. Il vient d'être récemment publié, sa diffusion ayant été en partie retardée par les événements que vous connaissez.

Mais le C.N.R.S. n'a pas voulu en rester là et ceci pour plusieurs raisons considérées comme essentielles :

- d'abord parce que la crise de l'énergie est un phénomène mondial dont les conséquences sur le plan national imposent une véritable mobilisation du potentiel scientifique et technique du pays.
- ensuite parce que le C.N.R.S. avait entrepris depuis quelques années, une action également importante pour l'accroissement des relations entre le secteur socio-économique et celui de la recherche, notamment par le biais des laboratoires des sciences pour l'ingénieur. D'après nos estimations, c'est un effectif de près de 900 chercheurs qui travaille dans ces laboratoires sur des problèmes



Plateforme offshore.

liés, de près ou de loin, à l'énergie et leur sensibilisation pouvait s'avérer particulièrement utile.

• enfin parce que – contrairement à ce que l'on croit souvent – de nombreux chercheurs aspirent à avoir une activité qui débouche sur des objectifs utilisables à moyen terme par la société. Cette attitude se rencontre même fréquemment chez les chercheurs qui mènent actuellement les recherches les plus spéculatives.

Ainsi, sur l'ensemble de ce premier point de mon exposé je crois pouvoir vous proposer comme conclusion que les actions spécifiques que le C.N.R.S. a mise en place dans le domaine de l'énergie

non seulement n'ont pas subi une « certaine constante de temps » que d'aucuns ont cru déceler mais encore se situent dans l'optique d'une ligne politique continue et non pas conjoncturelle.

Venons en maintenant plus précisément au problème du bilan des groupes de réflexion et de prospective, bilan qui nous préoccupe aujourd'hui.

Ces groupes dont la mise en place a constitué la première phase de l'accélération de l'effort du C.N.R.S. dans le domaine de l'énergie, ont commencé à travailler en février 1974 et ils présentent un certain nombre de caractéristiques qu'il est bon de mettre en avant.

D'une part, il s'agit de groupes mixtes comportant, pour parts égales, des représentants des milieux scientifiques et économiques. Il convient de souligner ici la nouveauté que constitue la participation de l'industrie à des groupes de travail du C.N.R.S. ainsi que l'esprit d'adhésion profonde que nous avons rencontré auprès de nos collègues du secteur économique et l'apport très positif qu'ils ont fait à nos groupes de travail.

D'autre part, par le choix judicieux des 400 personnalités qui les ont composé et qui ont travaillé ensemble de février à octobre, en bénéficiant notamment des conseils et de l'appui du comité des relations industrielles du C.N.R.S., les grou-

pes de réflexion ont pu largement en tenir compte dans leurs débats :

- d'abord des actions concertées - à court et moyen terme - mises en place par la D.G.R.S.T. sur la récupération assistée du pétrole, les schistes bitumineux, la géothermie, la récupération des minéraux dilués, les photopiles et les économies d'énergie. Plusieurs personnalités sont membres à la fois des comités d'action concertées D.G.R.S.T. et des groupes du C.N.R.S. ; certains animateurs sont communs.

- ensuite des actions spécifiques du ministère de l'industrie et de la recherche s'appuyant sur ses directions techniques et les centres techniques professionnels.

- enfin, des perspectives qui résultent des travaux du comité consultatif de la recherche et du développement dans le domaine de l'énergie, travaux dont les premières conclusions étaient déposées le 15 octobre dernier.

C'est grâce à la corrélation ainsi établie qu'ont pu être dégagées les données de caractère politique et les motivations économiques prises en compte pour la définition des objectifs des groupes ce qui constitue un témoignage du souci de réalisme qui a présidé à leurs travaux. Mais il faut également souligner que leurs délibérations ont été marquées par d'autres éléments dominants parmi lesquels on peut citer - au tout premier rang - la prise en compte des problèmes d'environnement, de pollution et de sécurité.

Seize groupes de réflexion ont donc travaillé de février à octobre 1974 et la variété des sujets qu'ils ont couvert a pu faire craindre à certains un danger de dispersion et partant, un risque d'inefficacité.

En réalité, cette dispersion n'est qu'apparente mais la diversité des thèmes couverts a été volontaire afin, d'une part, de laisser le champ relativement libre à l'imagination des membres des groupes et d'autre part, et surtout, de laisser largement ouvert le choix des scénarios apparemment possibles pour résoudre la crise de l'énergie.

Dispersion apparente donc mais diversité réelle et voulue, tout en conservant quelques grands thèmes fédérateurs. L'un de ces thèmes est celui qui vous sera présenté au cours de la matinée à l'occasion des cinq exposés qui vont suivre : il concerne la « récupération et la valorisation de l'énergie ». C'est d'ailleurs - d'après les premières conclusions du comité consultatif de la recherche et du développement dans le domaine de l'énergie - un secteur d'action indiscutablement prioritaire.

Partant des motivations économiques qu'il implique et qui peuvent aller jusqu'à un véritable redéploiement de notre appareil de consommation d'énergie, ce thème se traduit - pour nous C.N.R.S. - par des études fondamentales qui visent des sujets extrêmement divers : il s'agit par exemple, de la valorisation du carbone, dont la récupération peut se faire à partir des déchets, des combustibles pauvres ou des carbonates minéraux ; de la transformation et de l'utilisation des polymères solides, problème qui vise aussi bien l'économie de consommation des polymères eux-mêmes que celle des matériaux ; du recyclage et de l'enrichissement des matériaux, sujet qui montre bien la corrélation étroite qui existe entre les matières premières et les ressources énergétiques.

De même s'incluent naturellement dans ce thème : les procédés et méthodes de conversion des composés lourds du pétrole, ces derniers peuvent, dans quelques années, se trouver disponibles pour d'autres usages que le rôle de combustible qu'on leur fait actuellement jouer ; la synthèse des combustibles et la chimie du méthane, problème qui découle des mêmes motivations que les précédentes et peut amener, à moyen terme, la création d'une nouvelle industrie chimique de masse susceptible de constituer une solution de remplacement à la pétrochimie actuelle ; et d'une manière encore plus générale, l'optimisation des procédés de synthèse organique et minérale (ou des grandes opérations chimiques industrielles) qui peut orienter le redéploiement de notre industrie chimique, l'ensemble s'appuyant notamment sur des études poussées de modélisation des processus de base, et de développement des processus catalytiques sans omettre l'importance que présentent - pour ces recherches - l'approfondissement des connaissances sur les phénomènes de combustion et les théories et les techniques de la thermodynamique.

Cet après-midi, notre attention sera fixée, par quatre exposés, sur le thème central de la production et du stockage de l'énergie, dans lequel plusieurs voies peuvent se développer - certaines étant reconnues par le comité consultatif de la recherche et du développement dans le domaine de l'énergie comme des axes où l'action doit être immédiatement menée avec le maximum de moyens.

Le premier sujet traité concernera la « fission et la fusion nucléaires ». A ce propos, je préciserai que le groupe de réflexion basé sur ces thèmes autour de l'institut national de physique nucléaire et de physique des particules n'a entrepris ses travaux que récemment ce qui

excluait la présentation, aujourd'hui, d'un bilan complet. Cependant les liens étroits qu'entretiennent, dans ce domaine, le C.N.R.S. et le C.E.A. nous ont incité à demander à une éminente personnalité scientifique de ce dernier organisme de nous faire part de l'état actuel des réflexions en insistant particulièrement sur le domaine prometteur que représentent les recherches sur la fusion. Deux exposés suivront l'un sur l'hydrogène, spécialement les recherches à conduire sur sa production et son stockage, le second sur les travaux à développer dans le domaine de l'électrochimie dont les résultats peuvent être l'un des facteurs déterminants des progrès à attendre pour les vingt prochaines années.

On s'efforcera ensuite de vous présenter un tour d'horizon aussi complet que possible des problèmes liés aux recherches sur l'énergie solaire qu'il s'agisse de sa conversion directe (photoélectricité, photochimie et photosynthèse) de son utilisation par concentration optique ou des applications qu'elle rencontre dans le chauffage et la climatisation de l'habitat.

C'est enfin M. E. Lisle, directeur scientifique au C.N.R.S. qui vous présentera lui-même en fin d'après-midi les travaux du groupe qu'il a animé sur les thèmes des recherches qui lient l'énergétique aux sciences économiques.

Malgré notre souci d'exhaustivité, il ne nous a pas été possible d'inclure dans le programme de la journée certains des thèmes abordés par les groupes de travail. C'est ainsi qu'il ne sera pas fait mention notamment des conclusions des groupes « sciences de la terre », et « physique du solide ». Cependant les résumés de leurs délibérations figurent dans les documents qui vous ont été remis et leurs animateurs demeurent à votre disposition pour répondre aux questions que vous seriez amené à leur poser.

Je viens d'aborder ainsi le problème de la méthodologie de travail de notre journée. Je préciserai que chaque conférencier présentera les principales conclusions de son groupe ou d'un ensemble de groupes et vous rappellera les motivations le plus souvent de caractère économique, qui ont constitué les points d'appui de leurs préoccupations, indiquera la liste des principaux thèmes des recherches qui se sont dégagés de leurs travaux - et surtout détaillera - à titre d'exemple démonstratif - quelques sujets de recherches qu'il conviendrait plus spécialement de conduire. Les sujets de recherches qui seront inclus dans les exposés ont été choisis, pas toujours en raison de leur importance, mais plutôt pour illustrer le type de recherche que le C.N.R.S. peut orienter et développer.

Après chaque exposé – une discussion suivra et nous comptions fermement sur chacun d'entre vous pour que ce débat soit le plus animé possible.

Cependant – et à propos de ce débat – je voudrais à nouveau insister sur quelques points : cette journée n'est pas et ne saurait être destinée ni à vous offrir ni à débattre les solutions immédiates du problème de la crise de l'énergie. Pour nous C.N.R.S., ce sont d'autres instances et certainement aussi de vos réactions que nous attendons la définition du cadre dans lequel doit se dérouler notre action ; mais cette journée doit aussi rappeler que la solution des problèmes de l'énergie passera, le plus souvent, par une meilleure analyse, une meilleure compréhension des phénomènes de base. Ce sont ces thèmes que nous nous sommes efforcés de dégager à partir de cette profonde conviction et qui, bien entendu, sont plus spécialement destinés aux laboratoires du C.N.R.S. et des universités.

Enfin, les discussions des groupes de travail du C.N.R.S. ont, en fait, mis en route une dynamique de réflexion. Ce que nous vous proposons aujourd'hui doit être considéré comme une simple étape et nous sommes certains que des discussions qui ont été ainsi lancées naîtront de nouvelles et nombreuses idées originales. On peut même dire que si la journée d'étude de ce jour était reprise dans un an, on pourrait fort bien mettre en évidence des thèmes qui aujourd'hui ne seraient qu'à peine effleurés, voire même ignorés.

En tout état de cause et en tenant compte des remarques que je viens de faire, c'est une première – et certainement incomplète – analyse d'un modèle général de la recherche dans le domaine de l'énergie que les tableaux joints en annexe aux documents qui vous ont été remis – s'efforcent de vous présenter.

Etat par groupe, ils indiquent à côté des principaux objectifs qui ont conduit à leur mise en place, qu'il s'agisse des économies d'énergie ou de matières premières, ou encore de nouvelles techniques dans la mise en œuvre des ressources énergétiques, les principaux axes de recherches qui semblent se dégager actuellement ainsi que les motivations économiques qui les confortent.

Enfin, ils font apparaître les convergences des axes de recherche et ainsi les grands thèmes qui devraient être plus particulièrement soutenus.

Vous pouvez maintenant – en ce point de mon exposé – vous poser – avec juste raison – la question « Et après... ». Cette montagne (apparente) que le C.N.R.S. a bâtie... va-t-elle accoucher d'une souris... C'est une chose que l'on pourrait craindre en effet – notamment si l'on considère les moyens affectés à la recherche scientifique plus particulièrement dans notre pays. Sans vouloir comparer avec ce qui existe aux Etats-Unis, on doit mentionner que le budget « recherche » prévoit pour la seule « national science foundation » en 1975 : un supplément de 38,7 millions de dollars pour les recherches de base par rapport à 76,5 millions de dollars en 1974 ; et un supplément de 66,8 millions de dollars par rapport à 72,2 millions de dollars en 1974 pour les recherches appliquées aux besoins nationaux ; la presque totalité des augmentations ci-dessus, soit plus de 100 millions de dollars, portant sur des thèmes de recherche liés à l'énergie.

Nous sommes très loin en France, même en ajoutant les budgets des délégations à l'énergie, à la recherche scientifique et technique, du C.E.A., du C.N.R.S. etc... de consacrer un tel accroissement de crédits aux programmes des recherches sur les problèmes énergétiques, et ceci ne manque pas de préoccuper certains d'entre nous.

En effet, il ne faudrait pas que dans l'équation générale : matières premières + énergie + matière grise – matériaux de consommation et même si l'on considère la matière grise seulement comme un catalyseur l'on minimise par trop – comme le faisait encore tout récemment remarquer un billetiste du Monde – le coût de cette dernière.

Je suis persuadé que beaucoup d'entre vous partagent les mêmes préoccupations et l'un des résultats de cette journée pourrait être d'attirer l'attention des pouvoirs publics sur ce problème. Pour nous C.N.R.S. et même avec les moyens plus modestes qui nous sont consentis nous sommes résolus à poursuivre notre « longue marche ». Nous

sommes en effet convaincus, que dégager ou afficher des thèmes de recherche ce qui résultera, en définitive, des travaux des groupes, ne constitue qu'un volet – certes important – mais un seul volet de notre action.

Il faudra y joindre, pour améliorer son efficacité, d'autres manifestations du genre de celle d'aujourd'hui, aller dans les régions et dans les laboratoires afin – notamment – de sensibiliser les chercheurs et ingénieurs non seulement sur l'actualité de ces thèmes mais aussi sur le développement qu'ils doivent prendre dans l'avenir.

Ce n'est, en effet, qu'après avoir convaincu les chercheurs eux-mêmes qu'on pourra estimer que notre action d'orientation et d'incitation aura été menée à bonne fin.

Si tout ceci peut, a priori, nous apporter quelque satisfaction et nous donner, pour le moins, une bonne conscience de notre utilité dans « la grande affaire du monde de notre temps », il est un autre élément qui présente une importance tout aussi grande : c'est que les problèmes de l'énergie ne peuvent être, au fond, dissociés de ceux relatifs à la société, aux modes de civilisation et aux styles de vie.

Les changements que nous connaissons et que peu ont su prévoir, attirent ainsi l'attention sur notre relative méconnaissance des relations entre système énergétique et système social.

Alors, je veux croire que l'une des conséquences et non la moindre, des travaux de nos groupes de réflexion pourrait être leur contribution à une étude plus approfondie sur les problèmes que je viens d'évoquer. Ceci, en particulier, pourrait nous éviter de tomber dans le piège d'une prospective qui ferait seulement intervenir des choix de caractère technologique.

Et c'est bien d'ailleurs, comme je le disais en tête de mon exposé l'un des bénéfices parmi les avantages divers que peut retirer de la recherche fondamentale un pays qui a su faire un investissement sérieux dans ce domaine.

Souhaitons que ce soit... encore... le cas de la France.

Jean LAGASSE
directeur scientifique
adjoint au C.N.R.S.

La valorisation du carbone

Les contraintes que nous subissons nous amènent à réfléchir à des sources de carbone qui soient indépendantes des produits pétroliers. Elles existent sous deux formes dans la nature :

- les déchets d'origines diverses qu'elles soient industrielles, ménagères ou agricoles,
- les réserves, quasiment inépuisables, sous la forme de roches calcaires.

Faire un classement de ces choix tout en demeurant réaliste, et imaginer des valorisations de ce carbone ainsi récupéré, est une tâche de longue haleine et l'exposé qui suit ne peut en donner qu'une image.

Les opérations de valorisation comportent des utilisations de matières premières délaissées parce que considérées comme sources trop pauvres ou trop dispersées et des récupérations de déchets, ces déchets pouvant être obtenus au cours d'une fabrication ou après usage.

Il existe d'ailleurs déjà de nombreux cas importants de récupération. Ces récupérations portent non seulement sur des métaux tels que le plomb et le cuivre ; mais aussi sur des dérivés du carbone tels que le papier et les fibres textiles. Enfin, une forme de récupération de matières soumises à des transformations chimiques industrielles consiste à mieux utiliser la matière première et à améliorer le rendement des processus mis en œuvre (ce qui sera développé dans un autre exposé). Une récupération d'énergie jointe à la valorisation précédente est également entreprise en particulier par le moyen d'économies d'énergie consommée au cours des transformations de la matière.

Il existe actuellement des facteurs favorables au développement des opérations de valorisation. Ce sont : la modification des paramètres économiques liée aux changements des valeurs relatives de nombreuses matières premières ; des progrès scientifiques et techniques concernant des sciences fondamentales (chimie macromoléculaire et physicochimie) de même que des sciences de l'ingénieur (génie chimique, automatique, informatique appliquée), et également l'évolution de la situation industrielle qui résulte de l'équipement de nouvelles usines puissantes et modernes à proximité de sources de matières premières riches.

Ces nouveaux centres industriels en création tendent à modifier à court et moyen terme les marchés offerts aux échanges internationaux des produits fabriqués. Or la puissance des centres de recherche et le potentiel de chercheurs utilisables constituent des facteurs économiques d'une très grande valeur.

En conséquence la préparation de l'avènement d'une nouvelle génération d'unités industrielles utilisant pleinement des progrès scientifiques et techniques récents peut constituer un atout important dans l'évolution de la situation économique nationale.

Le carbone n'existe pratiquement pas à l'état libre naturel et l'utilisation du carbone, corps simple, n'a qu'une place limitée par rapport à l'utilisation de ses très nombreux composés.

Les composés du carbone utilisés sont d'une extrême variété. Ils forment en effet les nombreux constituants des substances végétales et des substances animales ; les matières organiques fossiles qui jouent actuellement un rôle majeur dans l'approvisionnement en combusti-

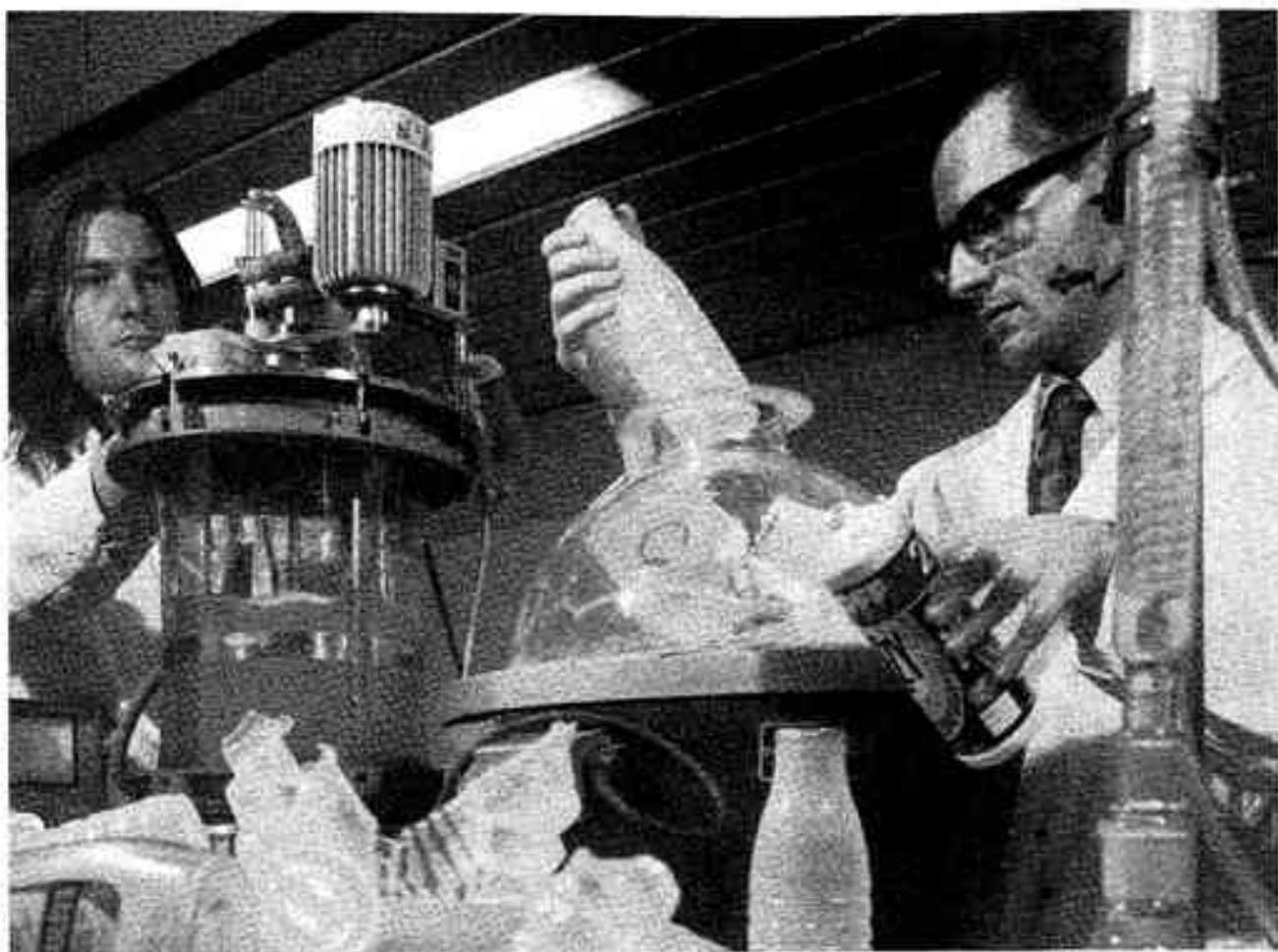
bles ; les carbonates (surtout les calcaires) qui forment la réserve fondamentale du carbone sur la terre et les déchets d'origines diverses (déchets urbains, industriels et agricoles) que l'augmentation de la population et de la production multiplie rapidement.

Le carbone est un élément d'une importance exceptionnelle car il est le constituant essentiel de la quasi totalité des combustibles. Il est un élément fondamental de la matière vivante et par conséquent des aliments (tant pour l'homme que pour le bétail). Enfin de nombreuses matières premières industrielles de très grande importance sont constituées de composés du carbone.

En conséquence, il est apparu préférable que, dans une prospective générale, ne soient pas distinguées systématiquement les valorisations du carbone d'intérêt énergétique des autres valorisations, car certaines matières peuvent être utilisées dans plusieurs secteurs économiques différents. Vu la diversité des importations de matières carbonées, des réductions de consommations associées à certains usages peuvent faciliter des importations orientées vers des usages énergétiques. Les problèmes posés par la valorisation de ces matières si diverses sont eux-mêmes multiples. Les substances qui présentent un intérêt majeur au point de vue énergétique sont très nettement actuellement les combustibles fossiles riches.

En ce qui concerne le pétrole et le gaz naturel se posent des problèmes de prospection et de mise en exploitation qui n'ont pas à être traités ici.

Il y a aussi un problème de plus complète récupération du pétrole des gis-



Faculté de Médecine de l'Université de Manchester : recherches visant à transformer en protéines les vieux contenants en matière plastique que l'on décompose par action microbienne.

ments mis en exploitation, ce qui sera présenté dans un autre exposé et ce qui peut faire appel à des technologies de gazéification examinées un peu plus loin. Les problèmes de combustion et d'amélioration générale des transformations chimiques subies seront également présentés dans deux autres exposés.

Une valorisation des fuels par une autre technique que la combustion directe sera examinée plus loin.

La disponibilité de quantités considérables de gaz naturel et de pétrole pour au moins plusieurs dizaines d'années amène à examiner très soigneusement l'aspect économique de l'acquisition de valorisation d'autres matières carbonées dans un but énergétique. Or la matière la plus intéressante dans l'état actuel de l'économie est la houille, lorsque l'on a mis à part gaz naturel et pétrole. Il se trouve que les ressources nationales de houille ne présentent pas les caractéristiques économiques favorables des grands gisements étrangers largement dotés de couches puissantes et peu profondes. En dehors de ce premier groupe des combustibles riches, on ne trouve que des matières carbonées dont l'intérêt économique pour la production d'énergie est très limité ou même a été insuffisant jus-

qu'ici, d'où l'importance de recherches et de réalisations de production d'énergie par d'autres moyens que la combustion de dérivés du carbone.

Les grands problèmes d'approvisionnement et de combustion relatifs aux combustibles riches étant séparés des problèmes de valorisation à examiner ici, on a à classer les thèmes de recherches qui peuvent présenter un intérêt économique suffisant. Des études technico-économiques deviennent nécessaires et doivent souvent être placées avant l'engagement des recherches scientifiques. A côté de problèmes spécifiques d'un mode particulier d'emploi et généralement examinés par un groupement professionnel et technique déterminé (tel est le cas de la valorisation des vieux papiers), on peut regrouper les recherches de valorisation des composés du carbone autour de quatre thèmes principaux.

- les traitements thermiques avec ou sans action combinée de gaz, en particulier la pyrolyse, l'hydrogénolyse et la gazéification,
- la réduction du dioxyde de carbone,
- l'obtention de protéines de récupération,
- l'amélioration des connaissances

acquises sur de nombreuses substances macromoléculaires naturelles.

On peut faire les remarques suivantes au sujet des thèmes retenus.

Les traitements thermiques ont pour but de mieux utiliser la matière carbonée. Dans la majeure partie des cas, de tels traitements permettront de passer d'une substance qui présente un faible intérêt en vue d'une combustion directe à des substances dont la combustion sera utilisable dans de meilleures conditions ou dans des engins qui nécessitent un combustible plus recherché : c'est le cas des schistes bitumineux par exemple.

On doit d'ailleurs observer qu'à côté de l'énergie libérée par un combustible, il faut aussi considérer l'aptitude de ce combustible à être transporté, stocké, distribué et à être utilisé dans différents types de générateurs d'énergie (brûleurs ou moteurs).

La réduction du dioxyde de carbone ne peut pas permettre une production d'énergie nouvelle. L'énergie libérée par combustion des produits de réduction ou d'hydrogénation du dioxyde de carbone ne peut qu'être inférieure à l'énergie effectivement consommée pour obtenir ces produits de réduction ou d'hydrogénation.

L'intérêt d'une telle opération réside dans la possibilité de mettre de l'énergie sous une forme plus recherchée et mieux utilisable au prix de la perte d'une fraction limitée de cette énergie.

On peut réaliser seulement ainsi un vecteur d'énergie pour un coût qui jusqu'ici a été généralement prohibitif mais qui mérite un nouvel examen lorsque l'on envisage une utilisation énergétique de l'hydrogène (substance qui elle aussi ne peut être qu'un vecteur d'énergie), et lorsqu'on prépare la production d'énergie difficilement stockable et d'une origine étrangère aux produits carbonés.

Comme actuellement les études parmi les plus développées pour réaliser des productions complémentaires de protéines sont basées sur l'utilisation de fractions pétrolières, il apparaît légitime de placer ici des recherches de synthèses de protéines équivalentes ou meilleures sans utiliser de produits pétroliers.

Enfin la meilleure connaissance de substances complexes actuellement très sommairement utilisées doit permettre d'en réaliser une valorisation plus efficace. Le dioxyde de carbone subit sous l'action de la lumière solaire une réduction naturelle photochimique qui permet la synthèse de la matière vivante par les végétaux. Il en résulte qu'une extension de la végétation sur des zones précédemment arides et qu'un accroissement d'utilisation possible de la végétation par la culture entraînent un développement très profitable de cette récupération naturelle du gaz carbonique, d'où l'intérêt des problèmes que pose cette extension.

Car, actuellement, environ le quart seulement de la prairie française est cultivée et les grandes forêts de ce globe (forêts nordiques et forêts équatoriales) sont beaucoup plus l'objet de cueillette que de culture.

De plus certains végétaux fournissent des substances combustibles soit directement, soit après transformation comme cela peut être le cas de l'alcool éthylique de fermentation et leur développement constitue un problème méritant un examen.

Le gaz carbonique est aussi l'objet d'une valorisation industrielle qui est encore trop limitée.

L'action de l'hydrogène sur le dioxyde de carbone peut aller jusqu'à une hydrogénéation, que l'on passe nettement par l'intermédiaire de l'oxyde de carbone ou que l'on conduise la réduction du gaz carbonique par l'hydrogène jusqu'à l'obtention de dérivés organiques du carbone et de l'hydrogène.

Le passage du gaz carbonique au méthanol ou aux hydrocarbures (méthane ou essence) ne peut être que très partiellement et localement utile à réaliser dans un contexte économique où le gaz carbonique est souvent obtenu par combus-

tion d'hydrocarbures et où une très forte proportion de l'énergie utilisée provient de cette combustion des hydrocarbures mais l'intérêt économique de cette réduction et hydrogénéation du gaz carbonique pourra être nettement modifié et augmenté lorsqu'on pourra disposer d'importantes sources d'énergie ayant une origine totalement indépendante de la combustion des hydrocarbures.

Le débouché essentiel recherché pour les protéines et les acides aminés de synthèse est un usage alimentaire : soit que ces produits permettent de réaliser une alimentation humaine directe, soit, ce qui est fréquemment réalisé actuellement, que ces protéines servent à l'alimentation d'animaux d'élevage.

A cet effet, des relations entre l'origine de la matière protéique, sa composition et ses caractéristiques structurales d'une part et ses qualités alimentaires ainsi que son absence de toxicité d'autre part doivent être établies. Des essais conformes aux normes d'alimentation ont à être abondamment et judicieusement pratiqués. Ceci n'exclut pas d'autres possibilités d'emploi (masses plastiques, fibres...).

Les substances carbonées susceptibles d'être traitées par pyrolyse, hydrogénéation ou gazéification sont fort diverses et dans un certain nombre de cas de tels traitements sont pratiqués.

Les déchets urbains forment une masse de plus en plus importante (de l'ordre de onze millions de tonnes actuellement par an en France, dont plus de la moitié est mise en décharge contrôlée et un quart incinéré).

Les déchets agricoles ainsi que ceux des industries alimentaires forment des masses très grandes mais souvent très dispersées (sciure, écorces, pailles, déchets de betterave, de canne à sucre, pulpes, déchets de l'extraction de la cellulose) et dont la disponibilité est estimée de façons très différentes.

Les déchets industriels produits au cours des fabrications sont partiellement récupérés : cette récupération dépendant essentiellement de la nature du produit concerné, mais les déchets d'objets industriels après usage sont souvent dispersés. Cette dispersion entraîne des problèmes techniques de même que psychosociologiques de tri, de ramassage, d'agglomération ou de fragmentation et aussi des problèmes relatifs à la protection de l'environnement (c'est le cas des huiles usagées et des vieux pneumatiques). Par contre une partie des vieux papiers est déjà récupérée.

Il y a aussi des boues qui contiennent une certaine proportion de substances organiques et auxquelles se rattachent des problèmes liés à leur traitement.

Les roches contenant des substances organiques fossiles diluées dans une im-

portante matière minérale sont actuellement souvent délaissées alors que les substances organiques fossiles riches sont la base de la production actuelle d'énergie (pétrole, gaz naturel, houille). Les matières organiques fossiles diluées délaissées se rencontrent dans les schistes bitumineux ; les sables bitumineux ; les schistes houillers et la tourbe. On doit constater qu'en ce qui concerne ces substances la puissance ou la teneur en matière organique des ressources reconnues sont très variables avec les gisements et déterminent essentiellement l'intérêt de l'exploitation de ces matières déjà « pauvres ».

Il y a lieu de joindre à ces problèmes de matières organiques fossiles la récupération du pétrole qui est laissé dans les roches magasin après exploitation et qui représente plus de la moitié du pétrole potentiel des puits exploités.

Les carbonates (calcaires, roches dolomiques) constituent la réserve majeure du carbone présent à la surface et dans les couches superficielles utilisables de la terre mais le carbone y est oxydé à son maximum et les calcaires sont essentiellement utilisés actuellement pour fournir des matériaux de construction.

La diminution, envisagée à moyen terme de la consommation des fractions lourdes de pétrole dans des centrales thermiques, conduit à rechercher un usage de ces fuels lourds autre que la combustion. A partir de ces problèmes de recherches, des thèmes plus particulisés doivent être dégagés en étroite liaison avec les industries et les services administratifs concernés, de façon à coordonner efficacement les études entreprises sur ces problèmes avec celles des grands centres nationaux de recherches appliquées, et de façon à utiliser de façon optimale les équipes affectées à l'examen de ces problèmes.

Une judicieuse utilisation des moyens nécessite d'entreprendre des recherches dont l'intérêt économique est bien reconnu et dont les possibilités techniques de développement fructueux sont bien dégagées, l'association de recherches économiques aux recherches de récupération et de valorisation du carbone doit être une création progressive vu l'ampleur et la diversité des domaines susceptibles de telles recherches.

Ainsi la valorisation du carbone peut conduire à de plus complètes utilisations des substances organiques fossiles qui constituent les précieux combustibles riches si recherchés actuellement et aussi à tirer un profit – parfois indirect au point de vue énergétique – d'autres matières carbonées dont certaines sont encore délaissées.

Henry BRUSSET
Professeur à l'école centrale
des arts et manufactures

Les matériaux dilués et le recyclage

L'existence sur le sol national de minerais dilués constitue, pour la France, une potentialité à laquelle la délégation générale à la recherche scientifique et technique a déjà réfléchi et, plus particulièrement, sur la base d'un inventaire lié aux méthodes d'extraction actuellement connues.

Les méthodes physiques d'extraction paraissent moins applicables à ce type de matériaux et, de toute manière, demandent à être optimisées par une approche scientifique en vue de diminuer la consommation d'énergie. D'une façon plus générale, l'on peut se demander si une étude plus approfondie des interactions solide-liquide, ne permettrait pas d'en déduire des méthodes chimiques d'extraction.

Les besoins mondiaux en matières premières en l'an 2000 s'élèveront à 4,5 fois la consommation actuelle si l'on prend pour base un taux moyen annuel d'accroissement de 5 % égal à celui observé pendant les dix dernières années, cet accroissement se décomposant en :

- 2 % attribuables à l'augmentation de la population du globe,
- 3 % attribuables à l'augmentation de son niveau de vie.

C'est la raison pour laquelle le rapport alarmiste du club de Rome « limits of growth » réalisé par le professeur Meadows du M.I.T. et diffusé en 1972, prédit un effondrement de notre système par suite d'une pénurie de matières premières vers l'an 2010. Ce rapport, bien que critiquable sur la manière dont ont été calculés les taux d'expansion démographique et économique, permet d'accélérer les études de prospectives et de recherches.

L'augmentation de la population, et donc des besoins, et le contrôle par l'homme des forces de la nature dépendent de l'utilisation des ressources minérales telles que les produits énergétiques, les minerais métalliques ferreux et non ferreux, les minerais non métalliques et les substances utiles. Certains de ces produits ne sont pas ou peu renouvelables, notamment les substances énergétiques ; par contre, les métaux et les matériaux de construction pourraient être recyclés dans une proportion plus large qu'à l'heure présente.

Pour un élément donné, un minéral présente des teneurs toujours supérieures à la teneur moyenne de la croûte terrestre. Mais la notion de minéral est variable dans le temps et dans l'espace, et les teneurs exploitables diminuent régulièrement avec les progrès technologiques et l'épuisement des réserves à forte teneur.

Simultanément, les réserves mondiales augmentent. Ainsi les réserves mondiales de cuivre sont de 60 MT si la teneur exploitables est de 2 % et de 600 MT si la teneur exploitables s'abaisse à 0,6 %. A l'extrême, un kilomètre cube de granite, présentant une teneur de cuivre de 100 ppm, contient environ 200 000 tonnes de métal et il n'est pas impossible d'extraire cet élément si l'on dispose d'énergie en quantité suffisante et d'une technologie très évoluée. Si l'on considère les teneurs actuellement exploitables ou les quantités récupérables économiquement et technologiquement, la durée de vie des réserves mondiales sont les suivantes, en prenant pour base un taux de progression de la consommation égal à la moitié de celui constaté au cours des dix dernières années.

Métalliques	Non métalliques	Durée de vie des réserves mondiales
Uranium		de l'ordre de 20 ans
Or	Fluorine	
Argent	Amiante	de l'ordre de 30 ans
Tungstène		
Étain		
Plomb		
Cuivre	Pétrole	
Molybdène	Gaz naturel	de l'ordre de 35 ans
Zinc		
Béryllium		
Mercurie		
Tantale		
Cobalt		
Chrome		
Manganèse		
Fer	Charbon	supérieure à 50 ans
Bauxite		supérieure à 100 ans



Mine de cuivre à ciel ouvert aux environs de Bingham, Utah (USA) (Photo USIS)

Il faut donc s'attendre dans les décennies qui viennent, à l'épuisement progressif des réserves considérées comme telles en 1974, donc à une augmentation des prix, à un développement mondial de politiques de nationalisations. Il en résultera, pour un pays industrialisé gros importateur de matières premières, de graves difficultés d'approvisionnement. En effet, une matière première possède plus que jamais une valeur politique, étant donné qu'elle est indispensable à l'industrie nationale et à la progression du niveau de vie des citoyens d'une nation. Qu'en est-il pour notre pays ? Si l'on se limite seulement aux substances non énergétiques, nous dépenserons en 1975 : quatre milliards pour les approvisionnements en cuivre ; plus de deux milliards pour les approvisionnements en phosphate ; deux milliards pour le reste : plomb, zinc, étain, etc...

Devant une telle situation, il est possible de réagir à différents niveaux :

• en augmentant l'effort de prospection

sur le territoire national, non seulement pour dégager des réserves nouvelles de matériaux dilués, mais encore pour valoriser de petits gisements. Il est pensable, que nous serons capables pour les métaux, de doubler notre degré d'autosuffisance pour les prochaines années. Le problème se compliquera de contraintes venant :

– de la hausse des prix pétroliers. Cette hausse n'a pas une grande incidence sur le choix des types d'exploitation. En effet, la différence de coût de l'énergie consommée à la tonne entre les gisements étendus (exploitation en carrière) et les petits gisements (exploitation souterraine) est faible puisque le coût est de 3,90 F/t pour les premiers et 4,03 F/t pour les seconds. Par contre, pour les gisements à substances très diluées, il sera nécessaire de dépenser beaucoup d'énergie pour récupérer peu de métal, étant donné l'énorme masse de substances sans valeur qu'il sera nécessaire de traiter afin d'obtenir un concentré métallique utilisable par les métallurgistes.

– de l'environnement. D'énormes exploitations de matériaux dilués rendront plus précaires les conditions souvent mauvaises de celui-ci. Par exemple, une exploitation de schistes bitumineux pour être rentable nécessitera une extraction journalière de 80 000 t (soit une production annuelle équivalente à la production charbonnière française), une exploitation des coupoles granitiques à étain, niobium, tantale, lithium, nécessitera une extraction journalière de 30 000 t, et ceci aura lieu dans un pays où le degré d'occupation des terrains est élevé.

– du bien fondé économique d'installer une usine d'enrichissement. Il est certain que beaucoup de gisements connus en France ou à découvrir présentent un tonnage trop faible de substance valorisable pour installer économiquement une usine.

- en jouant au niveau des substitutions entre matériaux. Dans ce cas, nous sommes placés dans une situation incertaine. En effet, on connaît mal les nouveaux prix d'équilibre énergie - matériaux par suite de l'évolution rapide du coût de l'énergie, et si l'on connaît avec une assez grande précision le contenu énergétique d'un élément donné lors de l'élaboration des matériaux, on connaît mal son potentiel énergétique par rapport à une éventuelle substitution en vue d'une utilisation donnée. Lorsqu'ils sont connus, les différences de potentiel énergétique entre métal et substitut ne sont pas probantes. Enfin, la définition d'une politique de substitution devrait s'appuyer obligatoirement sur un inventaire systématique des propriétés des différents matériaux, inventaire qui reste à établir. Ainsi, malgré le prix élevé des métaux, on assiste à peu de phénomènes de substitution, en grande partie parce que dans la plupart de leur utilisation, les métaux de base de l'industrie apparaissent comme irremplaçables sur le plan de leurs propriétés.

- en poussant au maximum l'utilisation des sous-produits du traitement et en évitant d'en faire des rejets inutilisés.

- en développant le recyclage des déchets. Pour les métaux, celui-ci est beaucoup moins consommateur d'énergie que l'élaboration du métal vierge. Pour l'aluminium, le recyclage entraîne moins de 5 % de l'énergie nécessaire pour l'élaboration du métal de première fusion. Pour le plomb, la production du métal de deuxième fusion économise 23 % de l'énergie consommée pour la production de première fusion. Enfin, le recyclage permet de remettre en œuvre une masse de matière dont il est logique de tirer parti. Malheureusement, la dispersion géographique de ces matériaux usagés et leur degré d'hétérogénéité sont un sérieux obstacle à un développement du recyclage.

En résumé, les modes d'action préconisés : effort de développement sur le territoire national ; rationalisation de l'emploi des matériaux que ce soit au niveau des substitutions qu'au niveau des recyclages, impliquent un effort à long terme. Bien que les positions que l'on est amené à prendre partant d'une situation donnée, soient toujours empreintes de conservatisme pour arriver parfois à des prévisions absurdes, il est certain que les difficultés d'approvisionnement en matières premières énergétiques seront un souci constant pour un pays consommateur : leur recherche et leur valorisation deviennent donc une des grandes priorités.

Les résultats qui pourront améliorer notre situation viendront nécessairement de l'intégration des découvertes de la recherche fondamentale dans les géosciences. Il faut donc d'une part opérer une mobilisation de la recherche fondamentale sur des buts bien précis car elle est seule susceptible d'améliorer la technologie et les méthodes actuelles ou d'en développer de nouvelles ; d'autre part, de se servir des connaissances ainsi acquises comme monnaie d'échange en créant des opérations de transfert matière grise - matériaux de base entre les pays consommateurs et les pays producteurs. Cette opération de transfert doit englober non seulement la définition des procédés mais encore l'apport matériel et humain lors de la création d'une industrie. Cette politique nécessite un déploiement de moyens nationaux mais on ne compte malheureusement que 250 spécialistes et praticiens français en minéralogie. Il faut donc mettre en œuvre au plus tôt des moyens très importants pour former de nouveaux spécialistes.

Les thèmes de recherche

Il est évident que lorsque l'on parle de matériaux dilués, la part du contenu énergétique du métal concernant les opérations d'extraction et de concentration va très rapidement en croissant à mesure que les teneurs des minéraux décroissent. Ainsi, pour le cuivre des minéraux sulfurés, le contenu énergétique du kilogramme de métal élaboré à partir d'un minéral à 1 % est de 16 kWh/t. Or, si l'on part d'un minéral à 0,6 %, le même kilogramme de métal nécessite 32 kWh/t. On constate qu'il existe une augmentation considérable de la consommation énergétique des opérations extraction et concentration quand la teneur du minéral chute. Il y a donc intérêt à gagner par amélioration des performances au niveau des postes énergétiques les plus consommateurs (broyage, flottation, etc...) et au niveau des récupérations du métal.

Les idées forces qui se sont dégagées des discussions au sein du groupe « matériaux dilués et recyclages » concernent tous les procédés de séparation en accentuant leur sélectivité et leurs rendements, pour ce faire, les opérations de recherche doivent être orientées vers la mise au point de méthodes permettant :

- des préconcentrations par voie physique ou chimique, les problèmes de séparation des éléments ou des associations de phases pouvant être ensuite résolus, même de façon coûteuse, étant donné qu'une grande masse de matériaux sans valeur aura été séparée. Ces préoccupations tiendront compte, non seulement de la dispersion des éléments diffus dans un matériau complexe et pauvre, mais encore de la distribution géographique du matériau (déchets et recyclage).

- l'étude des propriétés physiques, minéralogiques et chimiques des matériaux.
- l'étude des interfaces solide-liquide, la majorité des procédés étant réalisés en milieu liquide.
- l'étude des fines particules, soit au niveau de leur production (fragmentation) soit au niveau de leur traitement (séparation solide-liquide) par une meilleure connaissance des états colloïdaux ou finement dispersés.
- l'élaboration des procédés de séparation sélectifs pour obtenir des concentrés aussi purs que possible afin de faciliter les traitements métallurgiques.
- l'optimisation de procédés classiques par la mise en œuvre de moyens de régulation et de contrôle basés sur le développement de capteurs spécifiques fiables.

Certaines actions qui sont proposées ci-après nécessitent un effort à court, moyen et long terme suivant leur objet. Encore faut-il s'entendre sur ces termes selon que l'on considère le caractère d'urgence économique ou scientifique qui tendent d'ailleurs à se rejoindre en raison de nos difficultés d'approvisionnement. Nous considérons en priorité dans les lignes qui suivent le caractère scientifique, sans oublier que, dans certains domaines, des études fondamentales peuvent directement être engagées. Dans d'autres domaines, même des études très fondamentales doivent faire l'objet d'opérations préliminaires et urgentes visant à définir et formuler le problème à résoudre.

Actions à court et moyen terme

La définition de ces actions est délicate car il est toujours difficile d'évaluer la part du degré de méconnaissance dans l'optimisation d'un procédé lorsqu'il s'applique à une matière aussi changeante qu'un minéral.

Cependant, on peut citer les procédés physiques et chimiques : ils concernent surtout les études technologiques de procédés connus, soit de fragmentation, soit d'enrichissement par voie physique ou chimique et peuvent être centrés sur l'application de ces procédés au type de matière première qui présente des difficultés d'approvisionnement ou de traitement. De plus, des actions doivent être développées dans les applications du génie chimique, à l'enrichissement par voie chimique : on peut citer : pour les méthodes : techniques de broyage, techniques de classification, mesure de la granulométrie en continu, préconcentration par milieux denses et gravimétrie pour les fines granulométries, séparation magnétique à haute intensité dans l'eau, séparation électrostatique, flottation, automatisation et contrôle des circuits... ; pour les matériaux : phosphogypse, minéraux sulfurés complexes...

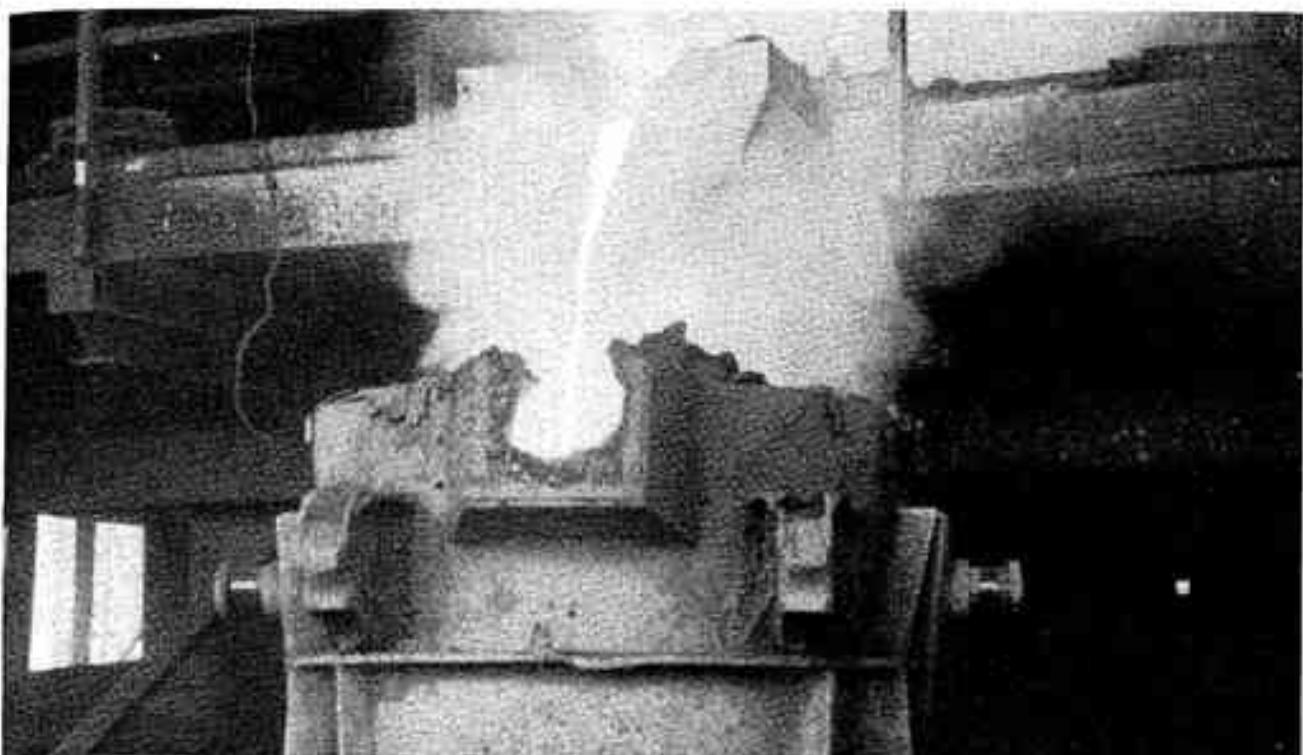
Recyclage des matériaux : étant donné l'hétérogénéité de ceux-ci, non seulement de composition, mais encore de localisation, il est urgent d'apporter un effort sur le traitement (techniques d'obtention et de séparation) et sur l'économie (inventaires et débouchés de ces ressources potentielles). Il s'agit d'un domaine immense peu ou mal exploité sur lequel il est impossible de prévoir des actions à longue durée par manque d'informations statistiques de base. Cette information existe cependant dans certains domaines (schistes houillers, résidus métallurgiques), elle doit être poussée pour les résidus de la consommation.

Thèmes de recherche à caractère fondamental

L'analyse des besoins de connaissances à saisir pour atteindre les objectifs fixés par le CNRS a fait ressortir les points suivants :

problèmes liés à la définition des matériaux tant du point de vue minéralogique, que chimique et physique : pour les minéraux à faible teneur : détection et localisation des éléments dilués dans les solides amorphes et cristallins, processus et mécanisme d'inclusion et d'insertion de ces éléments... ; pour l'ensemble des matériaux, minéraux ou produits de traitement : connaissance de la texture, des propriétés physiques de l'agrégrat (mécaniques, magnétiques, gravimétriques, porosité, perméabilité).

L'obtention de ces connaissances nécessite la résolution d'un double problème analytique et synthétique : analytique et méthodologique pour la détection, et synthétique, en envisageant à la fois les aspects cinétiques et thermodynamiques. Procédés intéressés : fragmentation (processus et énergie dépensée) ; procédés nouveaux (broyage, sous vide, par détente de fluide, par effet électrohydrostatique).



Crédit de métal en fusion : usine de la société le Nickel à Diamanté (Nouvelle Calédonie).

que) ; procédés de concentration physique (magnétisme à très haute intensité et supraconducteurs, gravité et médiums ferrofluides) ; procédés chimiques (conditions de lixiviation) ; procédés de séparation solide-liquide.

Problèmes liés à la connaissance de la physicochimie des surfaces : (interfaces solide-liquide-gaz). Il s'agit dans ce domaine d'étudier les lois de distribution d'un solvant et d'un soluté autour d'une surface minérale (interactions, ionisation, réactivité des surfaces...) et plus spécialement, l'efficacité des procédés de concentration est liée à une connaissance parfaite des propriétés de l'interface solide-eau. Les recherches doivent porter sur l'adsorption de l'eau et l'organisation des molécules d'eau au voisinage de l'interface : l'étude cinétique de la double couche électrochimique (en particulier formation des hydroxyles responsables de la charge superficielle et mesure de leur pK) ; l'étude de l'équilibre solide-solution aqueuse, de la cinétique de dissolution, de l'hypersolubilité des fines particules ; l'étude de l'adsorption des tensio-actifs et des macromolécules sur les particules minérales, des énergies dans la couche d'adsorption et de la modification des énergies normales de liaisons adsorbat-adsorbant. Le but est de déterminer les paramètres qui influent sur la sélectivité ou la spécificité des réactifs utilisés, par nécessité non polluants ; l'étude de la micellisation et des phases pseudomorphes.

Il ne faut pas sous-estimer les difficultés importantes de ce type d'études liées à un manque relatif de moyens analytiques

finis. Ces moyens devront être opérationnels avant la mise en place des programmes de recherches précités.

Procédés intéressés : séparation gravimétrique par milieu dense, flottation par écume et minéraux porteurs, concentration par flocculation sélective, séparation solide-liquide par coagulation et filtration.

Dans ce dernier cas, il serait nécessaire de poursuivre des recherches sur la dynamique de la filtration et l'amélioration de la porosité des gâteaux, l'étude des gels plus ou moins organisés et leur évolution rapide vers des phases cristallines, la modification des caractéristiques de l'eau.

Problèmes liés à la réactivité des matériaux. Les efforts doivent porter sur l'obtention d'une sélectivité de l'attaque des minéraux utiles. Les questions posées à ce sujet concernent :

- les possibilités d'apporter des modifications par traitement thermique ou minéral en vue de l'attaque sélective (« activation sélective »), par exemple : diffusion à l'état solide, permutations de sites, modifications structurales (transformations allotropiques), modifications de texture, modifications d'état chimique des éléments utiles.

- la nature et les propriétés des réactifs chimiques. Sur ce point, ont été envisagés successivement :

- les réactifs chimiques gazeux : il s'agit essentiellement de HCl , Cl_2 , SO_2 , CO_2 , CO , les principaux réactifs gazeux viables économiquement pour le traitement de minéraux pauvres. Le but poursuivi est généralement, soit de donner naissance à des formes facilement solubles

ensuite, soit surtout de volatiliser les éléments utiles (chlorures volatils, notamment), les séparant ainsi de la masse de stérile (traitement à température élevée). Il apparaît dans ce domaine de nombreuses lacunes dans la connaissance des équilibres solide-gaz (vapeurs), un manque important de données thermodynamiques (dans une gamme de températures étendue) permettant de prévoir ces équilibres. Une systématisation des connaissances permettant leur exploitation rapide et efficace, comme on le fait dans le domaine des solutions, serait très souhaitée :

- les réactifs chimiques liquides : compte tenu du fait que le rapport du volume de réactif à la masse du minéral ne peut ici, pour des raisons pratiques être trop faible, ce qui implique l'obtention de solutions d'attaque diluées en éléments utiles, il ne peut être fait appel qu'à des réactifs de bas prix de revient pour l'attaque des minéraux (ou éventuellement recyclables) ; les acides minéraux usuels en solution aqueuse diluée ou concentrée, voire pure, les solutions salines correspondantes et celles de carbonates de soude, éventuellement quelques liquides à températures élevées (solutions salines ou alcalines très concentrées, voire quelques sels fondus, comme par exemple les bisulfates) et sous pression (lixiviation en autoclave). Il est évident que la chimie pour tous ces liquides qui diffèrent nettement des solutions aqueuses diluées souffre encore de très nombreuses lacunes qui devraient être comblées peu à peu ;

- les réactifs d'origine biologique (action de bactéries...): leur intérêt réside dans leurs caractères sélectifs et surtout économiques; ils devraient permettre la lixiviation *in situ* (en fait, nécessaire à cause de leur lenteur d'action). Mais il s'agit tout de même d'une méthode délicate pour des raisons écologiques.

Une remarque a été faite à propos de la recherche d'économie d'énergie dans les procédés d'attaque chimique de minerais pauvres. Tout traitement thermique (pyrométaux et vapométaux) consomme beaucoup d'énergie à cause du chauffage de toute la masse de minéral, d'où le recours préférable à l'hydrométaux à température ordinaire. Mais c'est cette fois le volume de réactif consommé, même si celui-ci est un réactif économique, qui rend le traitement onéreux. La sélectivité d'attaque est le moyen de restreindre la consommation de réactif (utilisé alors en solution diluée). La grande sélectivité qui peut être obtenue par certains procédés pyrométaux (vapométaux) fait que, dans certains cas, cette méthode peut avoir certains avantages malgré la consommation d'énergie si une grande sélectivité est obtenue. La lixiviation *in situ* peut être considérée en fin de compte comme la méthode la plus économique, mais les cas d'application sont rares, compte tenu des précautions à prendre pour ne pas endommager l'environnement.

Problèmes liés au traitement des produits d'attaque dilués. Le traitement des produits d'attaque (supposés clarifiés de tous les déchets, qu'il s'agisse de solutions liquides ou de vapeurs) pour l'obtention de concentrés purifiés (partiellement) devrait aussi subir des améliorations par l'introduction ou le développement de techniques plus efficaces.

En ce qui concerne les produits volatilisés, leur condensation sélective à l'état solide fait apparaître divers problèmes, soit d'état chimique en phase gazeuse (nature de combinaisons), soit d'état des dépôts obtenus (sélectivité des condensations, évolution des solides formés). Cet aspect doit rejoindre les préoccupations d'une RCP (recherche coopérative sur programme) du CNRS, en cours de formation sur les dépôts chimiques en phase gazeuse.

Les dissolutions sélectives des produits vaporisés dans les liquides appropriés (solvants, sels fondus) pourraient également permettre l'obtention de concentrés purifiés.

En ce qui concerne les solutions aqueuses, diluées en éléments à récupérer, les méthodes de concentration (ou préconcentration) et de purification de ces éléments sont nombreuses et les principales sont bien connues maintenant sur le plan fondamental: notamment, l'extraction liquide - liquide par des réactifs

organiques et les échangeurs d'ions de nature organique (résines). Les recherches fondamentales devraient être développées autour de moyens plus intéressants économiquement et encore mal connus: les échangeurs et fixateurs d'ions de nature minérale (synthétiques ou naturels comme par exemple la tourbe, très intéressante sur le plan économique: bas prix de revient et possibilité de la brûler ensuite, récupérant ainsi les éléments fixés sous une forme solide riche et accessoirement la chaleur de combustion), ainsi que les échangeurs d'ions à radicaux organiques greffés sur support minéral, les silices greffées par exemple; les réactifs dits de flottation ionique: réactifs formant avec les ions à extraire des composés solubles ou insolubles flottables (à signaler que ce procédé est en outre susceptible de résoudre de nombreux problèmes de dépollution). Il semble que les procédés basés sur l'utilisation de membranes ne présentent pas pratiquement, en ce qui concerne les traitements de solutions d'attaque de minéraux, tout l'intérêt qu'on pourrait leur accorder sous l'angle théorique (investissement trop important, fonctionnement défectueux des membranes actuelles dans les conditions industrielles...). Les procédés électrométaux peuvent parfois être employés au niveau de la concentration.

Les progrès à réaliser dans les opérations industrielles sur les concentrés sont principalement l'objet des préoccupations du groupe 16. Tout particulièrement en ce qui concerne les procédés électrométaux qui prennent tout leur intérêt à ce moment, l'électrodeposition de métaux solides à partir de milieux fondus suscite des problèmes qui font apparaître un manque de connaissances sur l'électrochimie dans les sels fondus et sur l'électrocristallisation. Cette conclusion est à porter à l'attention du groupe 16.

D'une manière connexe, il faut souligner l'ensemble des problèmes de génie chimique que soulève le traitement chimique des minéraux, notamment en ce qui concerne la lixiviation et la séparation solide-liquide.

Les problèmes de corrosion et d'usure des matériaux des installations de traitement, la recherche de nouveaux matériaux compatibles avec les nouveaux procédés, les nouveaux réactifs, ne seront résolus que grâce à la poursuite des études fondamentales dans ces domaines.

Problèmes liés au contrôle, à la régulation et l'optimisation des circuits industriels: l'accroissement du rendement d'extraction par une utilisation rationnelle des propriétés intrinsèques, indépendamment des connaissances fondamentales, est lié à l'optimisation des différentes phases du traitement des minéraux; à la

recherche technologique au niveau des appareils (optimisation technique); aux études des capteurs et à l'analyse des différentes boucles ou phases (optimisation économique) et au contrôle en continu et l'automatisation de l'ensemble du circuit (optimisation économique).

Deux approches sont alors possibles; une approche théorique: il s'agit de mettre en évidence les relations internes mécaniques, physiques, chimiques, qui expriment la structure dynamique propre du processus. Cette recherche s'appuiera notamment sur les connaissances fondamentales acquises et une approche pragmatique: on peut alors se contenter d'un modèle du type « boîte noire » qui relie les variables d'entrée aux variables de sortie, sans tenir compte des caractéristiques internes du processus. Cette voie de recherche est très utilisée au niveau industriel lors des essais d'optimisation et a permis des gains spectaculaires de rendement.

Dans les deux cas, il est nécessaire de développer l'étude de capteurs propres à mesurer certaines variables, en particulier: la mesure de la granulométrie en continu, la dilution de la pulpe, etc...

Conclusion

L'analyse précédente conduit à orienter les recherches selon des axes fondamentaux non classés par ordre de priorité:

- les recherches méthodologiques visant à une meilleure connaissance des propriétés physiques et chimiques des solides et minéraux.
- les études des équilibres chimiques et électrochimiques solide-gaz, liquide-gaz, et solide-liquide, dans un domaine des températures et pressions variant des conditions ordinaires à des conditions plus sévères.
- les recherches visant à une meilleure connaissance des propriétés superficielles des solides immergés dans l'eau et leur modification par des réactifs minéraux ou organiques.
- le développement de la chimie du solide vers l'étude des relations entre la structure, la texture et la réactivité.
- les travaux permettant les progrès dans le domaine de la cinétique hétérogène pour résoudre les problèmes de génie chimique du traitement des minéraux et de leur produit d'attaque.
- les recherches sur les actions biochimiques susceptibles de provoquer la mise en solution sélective.
- les recherches sur le contrôle, l'automatisation et l'optimisation des circuits de valorisation des minéraux par une modélisation appropriée des capteurs.

Pierre BLAZY
Directeur de l'école nationale supérieure de géologie appliquée et de prospections minières.

Adaptation et optimisation des grandes réactions chimiques industrielles

Les trois groupes de réflexion avaient des objectifs complémentaires, dans le cadre général d'une adaptation et d'une optimisation des grandes opérations chimiques industrielles. Le groupe n° 1, animé par le professeur Lozac'h, a centré sa réflexion sur la constitution des macromolécules du pétrole. Le groupe n° 2, animé par le professeur Deluzarche, a réfléchi sur le thème : synthèse des combustibles et des produits de base hydrocarbonés. Le groupe n° 16, animé par le professeur Metzger, s'est intéressé à l'optimisation des opérations chimiques industrielles.

L'ensemble de ces trois groupes a réuni au total 62 personnalités venant de l'industrie, de la direction des industries chimiques, des instituts professionnels, du C.N.R.S. et des universités. Une remarquable atmosphère de franche collaboration et de participation active s'est manifestée au long des quatre à six séances de réflexion que chacun des trois groupes a organisé. La méthode de travail adoptée par chacun d'eux a permis, dans un premier temps, de faire un inventaire des problèmes concrets soulevés par l'adaptation et l'optimisation des opérations de l'industrie chimique concernée par le thème puis, dans un deuxième temps, d'analyser de façon prospective la contribution que la recherche fondamentale était susceptible d'apporter à la résolution de ces problèmes et enfin de concrétiser cette analyse en formulant des propositions d'axes de recherches que le C.N.R.S. devrait développer dans le cadre de son activité dans le domaine des sciences pour l'ingénieur.

Je traiterai successivement les trois thèmes de réflexion en montrant, lorsque ce sera utile, les interactions et les harmonisations auxquelles ils ont donné lieu.

Groupe I

Le groupe n° 1 avait pour thème de réflexion « constitution des macromolécules du pétrole ». A l'origine de ce thème se trouve la perspective dans laquelle le programme de développement nucléaire affiché par le groupement français place l'utilisation des différentes coupes de pétrole importé.

Ce programme entraîne en effet une réduction considérable, dès 1985, de l'utilisation des fuels lourds, comme combustible industriel : de 25 MT en 1980, cette utilisation doit passer à 5 MT en 1985. Dans l'hypothèse du maintien de notre capacité de raffinage et d'un léger accroissement de la demande en carburant et en fuel domestique, l'industrie du pétrole sera donc amenée à modifier l'éventail de sa production et en particulier à diversifier l'usage de ces produits lourds qui deviendront excédentaires.

Leur transformation en produits plus légers, peut être envisagée en faisant appel à des technologies existantes mais qui imposent une purification préalable due au fait que ces coupes renferment la majeure partie des composés sulfurés et que les macromolécules qu'elles contiennent, et que l'on désigne sous le nom de résines et d'asphaltènes, retiennent la quasi-totalité des métaux présents dans les bruts. Une autre utilisation de ces produits lourds consistera à les valoriser par transformation chimique, soit directement pour certaines fractions nobles, soit après traitement pour les autres fractions. Dans tous les cas une meilleure connaissance de la structure de ces composés macromoléculaires présents dans les fractions lourdes est nécessaire pour permettre le développement des méthodes de purification et la découverte de nouvelles voies de valorisation.

De plus cette étude des constituants lourds pourra contribuer à consolider scientifiquement les efforts développés par ailleurs en vue de la récupération assistée du pétrole, en permettant de mieux comprendre les causes physiques, chimiques et mécaniques qui sont responsables du blocage, au sein des roches réservoirs, de près des 2/3 des hydrocarbures qu'elles renferment.

Face à ces problèmes concrets le groupe propose trois axes de recherche fondamentale :

Détermination de la structure des asphaltenes. Comme nous venons de le rappeler, ces macromolécules, dont le poids moléculaire dépasse 10 000, sont associées aux métaux contenus dans les fractions lourdes et forment des composés fortement adsorbés sur les catalyseurs dont ils réduisent considérablement l'activité et la durée de vie. Une meilleure connaissance de la structure de ces asphaltenes, et particulièrement du mode de liaison par lequel ils retiennent les atomes métalliques permettra d'améliorer l'élimination de ces derniers et contribuera, comme nous l'avons remarqué, à la compréhension des phénomènes de rétention de ces hydrocarbures dans les agglomérats.

Amélioration des techniques de séparation des asphaltenes par solvants par la connaissance des phénomènes liés à leur précipitation et la recherche de nouveaux solvants et additifs. Dans l'hypothèse d'une généralisation du désasphaltage des fractions lourdes, les quantités d'asphaltenes produites seraient considérables et justifieraient une recherche fondamentale en vue de leur valorisation chimique.

Mise au point de procédés de démetallation pour prolonger la vie des catalyseurs et diminuer la consommation d'hydrogène dans les procédés de traitement,

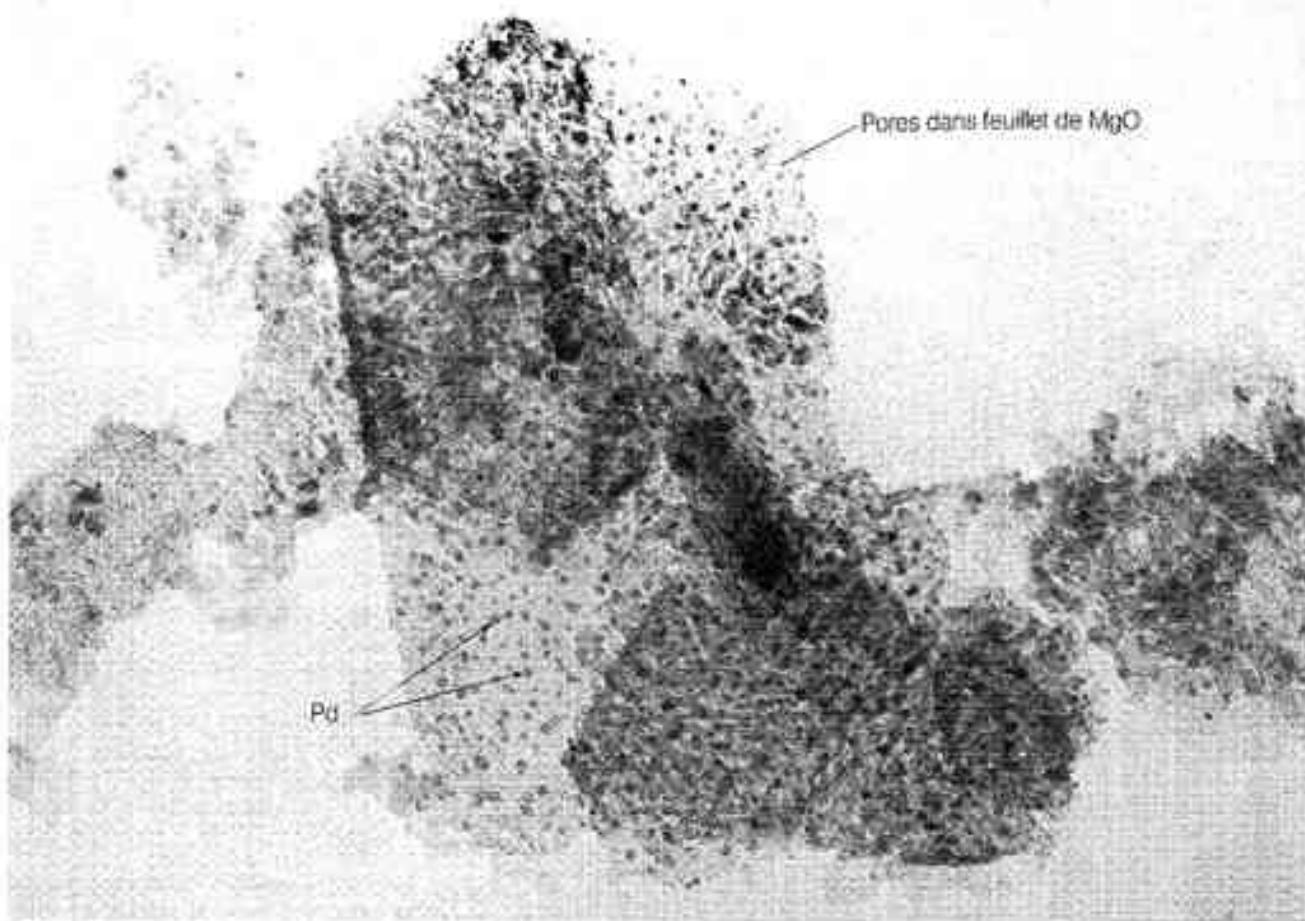


Fig. 1 - Palladium supporté par de l'oxyde de Magnésium (M sur MgO)

des produits lourds, sans séparation préalable des asphaltenes et des métaux qui les accompagnent. Parallèlement on pourra rechercher de nouvelles méthodes de traitement des fractions lourdes utilisant des catalyseurs en solution ou en suspension et mettant en œuvre des réactifs peu onéreux et disponibles comme l'eau, l'hydrogène, l'oxyde de carbone, l'ammoniac.

Group 2

Le groupe n° 2, avait pour thème de réflexion : « synthèse de combustibles et chimie du méthane ». A l'origine de cette réflexion se trouve la constatation que l'évolution de la conjoncture économique risque d'entrainer, même à moyen terme, une évolution importante dans l'éventail des matières premières carbonées disponibles pour l'industrie chimique organique et que le pays doit alors être prêt à assumer ce changement et à choisir ses nouvelles orientations en s'appuyant sur les résultats d'une recherche fondamentale qu'il convient dès à présent de définir et de susciter. C'est bien le rôle de la recherche fondamentale, à partir d'un objectif donné, de définir plusieurs voies d'accès possibles.

Un inventaire des ressources nationales montre en effet que d'ici 1985, la France disposera de 30 milliards de m³ de méthane et que à la même époque, le développement de l'électricité nucléaire pourrait laisser disponibles, comme nous l'avons rappelé tout à l'heure, près de 20 MT de fuels lourds. Dans une optique à beaucoup plus long terme, une pénurie possible ou une contrainte subite conduira à envisager les carbonates naturels comme source de carbone et l'eau comme source d'hydrogène.

C'est dans ce contexte que se place le travail du groupe qui retient trois axes pour sa réflexion, centrée en fait autour d'une valorisation chimique des petites molécules.

Etude du système CO-CO₂, H₂-H₂O. Ce système représente, à moyen terme, l'une des possibilités de développer une chimie de masse des produits organiques et des carburants, parallèle à la pétrochimie, et n'utilisant pas, comme cette dernière, le naphta comme matière première mais les résidus des coupes lourdes ou le méthane, ou éventuellement des déchets carbonés. Cette chimie du gaz de synthèse avait fait l'objet, avant la guerre, de travaux importants concré-

tisés par la mise au point et l'exploitation de procédés de gros tonnage comme le procédé Fischer-Tropsch. Il apparaît cependant que, depuis 1945, les recherches concernant ces réactions ont été plus ou moins abandonnées. Ces recherches méritent aujourd'hui d'être remises en chantier pour bénéficier des progrès considérables qui ont été faits en matière de catalyse de coordination, de catalyse hétérogène, de catalyse en milieux super-acide et super-basique et de génie chimique. Il sera possible en effet, grâce à ces progrès, d'améliorer les sélectivités et d'orienter à volonté les réactions vers la production de carburants ou vers celle de produits chimiques de base.

Etude du système $\text{CO}_2\text{-H}_2$. Ce système représente, à long terme, l'une des possibilités les plus intéressantes de remplacement des sources fossiles de carbone. Il n'a pas fait jusqu'ici l'objet de travaux importants et mérite par conséquent de susciter des recherches fondamentales, en vue de la synthèse de combustibles et de produits chimiques de base. Les études récentes sur l'activation de CO_2 par coordination et sur la photobi chimie ouvrent dans ce domaine, des perspectives particulièrement intéressantes.

Valorisation chimique du méthane et d'une manière plus générale des alcanes par création de liaisons C-C et par activation des liaisons C-H. La pyrolyse en acétylène est déjà pratiquée, on cherchera cependant des voies plus douces en réalisant des oligomérisations ou des polymérisations par catalyse de coordination ou en milieu super-acide. Quant à l'activation des liaisons C-H elle devra permettre d'atteindre la fonctionnalisation sélective des hydrocarbures saturés.

Groupe 16

Le thème de réflexion du troisième groupe, n° 16, était « opérations chimiques industrielles ». C'est un thème extrêmement vaste touchant à l'ensemble de la chimie industrielle, aussi bien minérale qu'organique et dont l'importance pratique, en termes d'économie d'énergie et de matières premières est considérable. Je citerai simplement quelques exemples pour concrétiser la dimension économique de ce problème : la pétrochimie française consomme annuellement 6 millions de tonnes d'équivalents-pétrole à la production des matériaux de base pour l'obtention des grands intermédiaires. Or malgré les nombreux travaux qui ont déjà été consacrés à l'optimisation de l'opération de vaporisation, le rendement en éthylène plafonne autour de 28 %, on conçoit l'importance de l'économie qui résulterait de l'accroissement, même limité à quelques points, de ce taux de conversion. La chimie de l'éthylène consomme dans notre pays, en 1980, 3 millions de tonnes de cette matière intermédiaire. On mesure aisément l'incidence économique de toute amélioration du rendement ou de la sélectivité portant sur les opérations de sa valorisation chimique. La grande industrie minérale pose elle aussi des problèmes d'une grande ampleur : la fabrication des engrains, par exemple, consomme dans notre pays près de 1 million de tonnes de soufre ; il est instructif de rapprocher ce chiffre de celui des 3 millions de tonnes de ce même soufre qui accompagnent, comme impuretés, les 100 millions de tonnes d'hydrocarbures que nous importons tous les ans. L'acide nitrique, fabriqué au rythme de 1 million de tonnes annuelles, est toujours produit au départ de l'azote, par une succession d'opérations de réduction et d'oxydation qu'une recherche fondamentale devrait permettre de rationaliser. Le chlore dont la production annuelle d'élève à 600 000 tonnes est utilisé, pour moitié environ, comme oxydant, c'est-à-dire qu'il se retrouve à l'état de chlorure : cette opération, coûteuse en énergie, pourrait, grâce à la recherche, être remplacée, dans certains cas du moins, par une oxydation plus directe qui réduirait du même coup

le problème de la pollution par les chlorures.

Le développement de l'énergie nucléaire va augmenter, dans d'importantes proportions le rejet de calories à basses température, dont on peut estimer la quantité, en 1980, à plusieurs millions de tonnes d'équivalent pétrole : la recherche de voies permettant la récupération, sous forme d'énergie chimique, de ces calories conduira à une économie importante, dans un domaine qui ne pourra que se développer. D'une manière générale enfin, la conception et le fonctionnement des procédés de l'industrie chimique sont, en dépit du traditionnel souci d'optimisation de cette industrie, toujours justifiables de recherches fondamentales en génie chimique susceptibles d'apporter d'intéressantes économies d'énergie, qu'il s'agisse du choix du schéma réactionnel à l'échelle du laboratoire, ou de sa transposition à l'échelle industrielle, comme des conditions de marche du réacteur ou de la séparation des produits.

Compte tenu de l'extraordinaire diversité des problèmes concrets posés par l'économie de l'énergie et des matières premières pour l'ensemble des opérations chimiques industrielles, le groupe de réflexion s'est divisé en six sous-groupes constitués autour des six thèmes généraux suivants :

- problèmes relatifs aux hydrocarbures
- chimie de l'azote
- le soufre et ses implications dans les procédés industriels
- chimie de l'hydrogène
- chimie organique
- génie chimique

Chacun de ces six sous-groupes a cherché à analyser la nature des difficultés, rencontrées par les industries de son secteur, en face de l'impératif d'économie d'énergie et à déterminer les domaines généraux où la recherche fondamentale était susceptible de contribuer à la résolution de ces difficultés. Une confrontation des réflexions des six sous-groupes a permis au groupe tout entier de dégager un certain nombre de thèmes très généraux de recherche fondamentale, susceptibles de contribuer à la résolution des problèmes d'énergie et de matières premières non seulement pour les secteurs particuliers analysés mais pour l'ensemble des opérations chimiques industrielles. Ces thèmes ont été réunis autour de quatre axes principaux de recherche.

- mise en œuvre des procédés
- processus catalytiques
- propriétés des milieux réactionnels
- utilisation et imitation des micro-organismes et des enzymes.

Mise en œuvre des procédés

Il est peut-être utile de rappeler à ce point les étapes du développement et de la mise en œuvre d'un procédé chimique, afin de montrer où viennent s'insérer les recommandations que nous formulons. Conception du procédé : la première étape est le choix d'un schéma réactionnel à l'échelle du laboratoire, définissant les matières premières, les systèmes catalytiques, les milieux réactionnels, etc... la seconde est la transposition à l'échelle industrielle, mettant en œuvre les méthodes d'extrapolation, pour aboutir au dessin des réacteurs et des installations annexes. Tout au long de ces étapes la préférence doit être donnée à des solutions alliant la souplesse et la fiabilité.

Fonctionnement du procédé : les principaux aspects sont : la préparation et l'épuration des réactifs ; le réglage optimal des conditions de marche, assurant la qualité de la production avec une consommation minimale d'énergie, d'utilités et de matières premières, tout en préservant l'environnement ; le réglage de la sélectivité par le jeu des facteurs purement chimiques (nature des réactions, choix du milieu réactionnel, catalyseurs...) et des facteurs liés au dessin des réacteurs et à la conduite de la réaction (débits des réactifs, profils de température...) ; la réalisation d'un dispositif de commande automatique ; la séparation des produits et le recyclage des réactifs non convertis. Pour faire face à ces différents problèmes, il est nécessaire de développer des recherches fondamentales, dans quatre directions complémentaires :

- la modélisation : la plupart des démarches que je viens de citer nécessitent en effet l'utilisation de bons modèles mathématiques, valables en régime permanent aussi bien qu'en régime transitoire.

Ces modèles trouveront leur usage à trois niveaux différents : modélisation des processus de base, en particulier sous leur aspect cinétique et thermodynamique ; modélisation des unités d'opération : réacteurs, échangeurs, colonnes ; modélisation des unités de production, résultant de l'association des unités d'opération. Il est donc important de développer les techniques de modélisation.

- la méthodologie de l'acquisition et du traitement des données thermodynamiques, cinétiques et structurales : l'objectif est d'obtenir et d'exploiter les données de base qui seront introduites dans les modèles. L'établissement de corrélations, chaque fois qu'il est possible, permet de systématiser l'utilisation de ces données. Une attention particulière sera portée aux mélanges tellement com-

plexes que leur description en termes de composés chimiques individuels n'est plus possible, comme par exemple une coupe pétrolière.

– la recherche de techniques d'analyse et de séparation, ces techniques interviennent en fait à toutes les étapes de la mise en œuvre du procédé : on insiste en particulier sur la recherche de nouveaux capteurs chimiques spécifiques, robustes et bon marché, sur le développement des méthodes d'analyse des traces, sur la découverte de nouveaux absorbants et adsorbants, de nouveaux solvants complexes dont les applications déborde-raient largement le cadre des procédés, pour atteindre celui de l'épuration des composés soufrés et celui de l'exploitation des minerais pauvres. D'une manière générale, il convient de promouvoir une recherche systématique des méthodes de séparation en mettant l'accent, sur celles qui ne font pas intervenir de fortes chaleurs latentes de changement d'état, consommatrices d'énergie.

– la conception de nouveaux réacteurs chimiques et le développement d'un gé-

nie biochimique et d'un génie photochimique : d'intéressants progrès restent encore à faire dans la conception de nouveaux réacteurs chimiques dans lesquels les transferts de matière et de chaleur se feraient avec une grande efficacité, au prix d'une dépense énergétique minimale. Il faut explorer les possibilités de couplages entre réaction exo et endothermiques simultanées. Dans le domaine de la biochimie industrielle, il est nécessaire de stimuler la recherche de réacteurs adaptés aux particularités de ses réactions afin d'assurer l'exploitation, à grande échelle, du remarquable outil qu'elles représentent. Dans celui de la photochimie industrielle, bien des problèmes relevant d'un véritable génie photochimique restent à résoudre avant d'assister une réelle extension de ses applications.

Processus catalytiques

Les processus de la chimie organique ou minérale relèvent très fréquemment de mécanismes de type catalytique, qu'il s'agisse de catalyse hétérogène, clé de la

plus grande partie de la pétrochimie, ou qu'il s'agisse de catalyse homogène (acide-basique ou par complexes de coordination) qui, outre ses applications industrielles, trouve des prolongements jusqu'en biochimie. Globalement on peut estimer que 80 % du tonnage de l'industrie chimique organique est produit par catalyse. Tout progrès même limité dans le domaine de la catalyse est donc susceptible de retombées importantes dans l'industrie. Plusieurs objectifs sont visés par la catalyse : gain de temps lié à l'activité du catalyseur, gain de matière lié à sa sélectivité et enfin gain d'énergie résultant de conditions plus douces et d'économies possibles dans les traitements en amont et en aval du réacteur lorsque le taux de conversion et la sélectivité sont améliorés. Deux lignes d'action doivent être retenues : trouver des systèmes catalytiques nouveaux ou meilleurs que ceux qui existent, pour effectuer des réactions connues ou des réactions nouvelles et comprendre le mode d'action des divers types de catalyseurs afin de réunir les meilleures chances de succès.

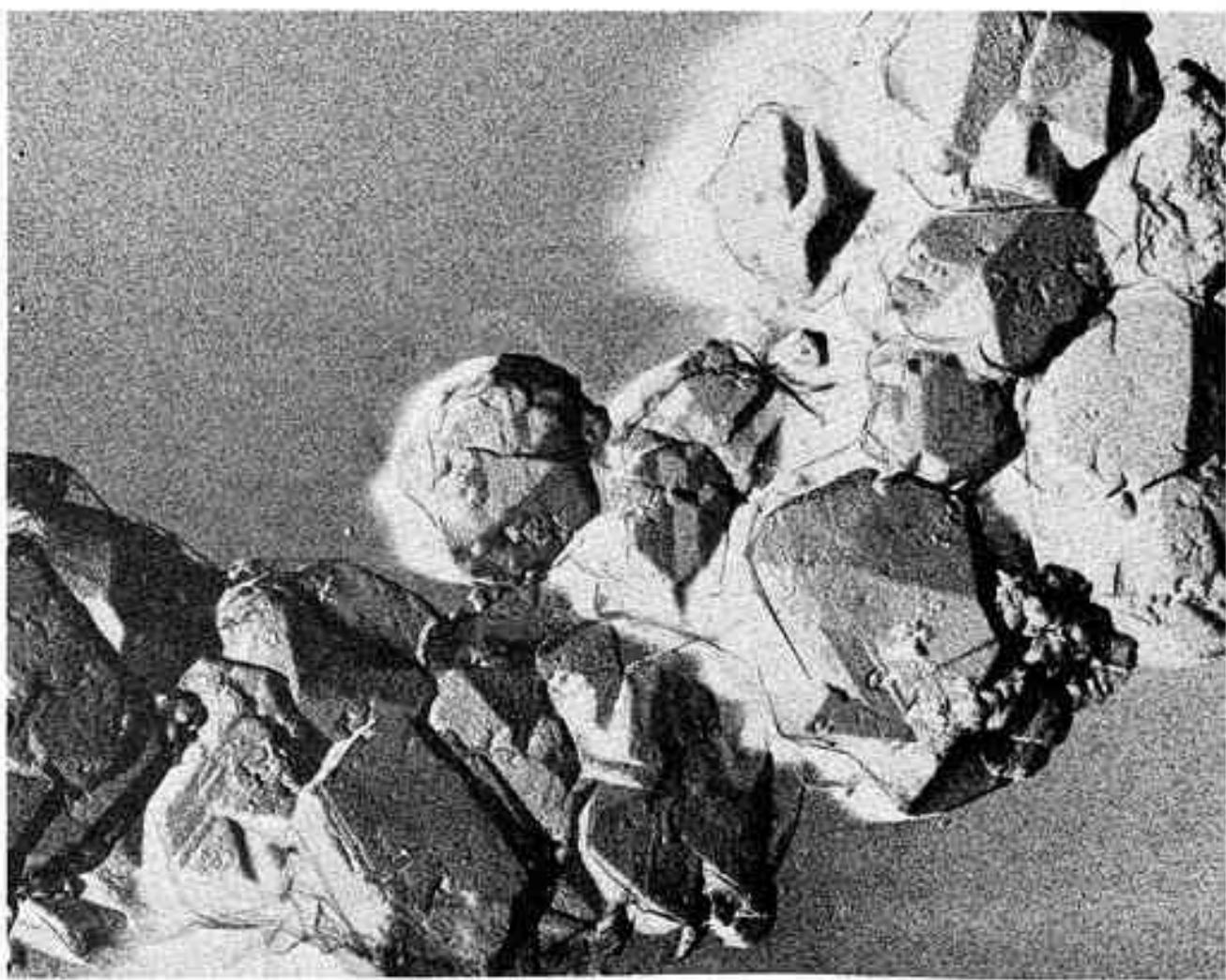


Fig. 2 - Institut de Catalyse - Zéolithe Nay - réplique à 30 000

Les recherches de ces deux types doivent constamment s'appuyer l'une sur l'autre. Les principaux axes de recherche qui ont été dégagés sont les suivants :

Pour les nouveaux systèmes catalytiques - recherche de nouvelles classes de composés métalliques et plurimétalliques possédant des propriétés actuellement imprévisibles (stabilité thermique des catalyseurs homogènes, amélioration de la sélectivité par le choix des ligandes) - recherche de catalyseurs hétérogènes résistant aux impuretés, utilisation des effets de structure, de texture et des modifications par des adjutants pour améliorer la sélectivité - recherche sur les systèmes superacides et superbasiques déjà signalés à propos des combustibles conjonction des modes d'activation par couplage des catalyseurs métalliques et des réactifs superacides ou superbasiques, fixation des catalyseurs homogènes sur support solide - nouvelles formes de catalyse micellaire, par transfert de phase.

Pour la compréhension des modes d'activation des catalyseurs : identification des intermédiaires réactifs, ions, radicaux, ligandes, espèces adsorbées - corrélations entre la labilité de ces intermédiaires et les propriétés physico-chimiques et structurales du catalyseur - étude du rôle du solvant sur le mécanisme de la catalyse.

L'ensemble de ces recherches fondamentales pourra se développer dans des domaines où les applications potentielles sont nombreuses. Je ne citerai que quelques exemples typiques : fixation de l'azote moléculaire, synthèse de l'ammoniac à basse pression, synthèse de molécules azotées à partir d'azote ou d'ammoniac, chimie de l'oxyde de carbone et de l'anhydride carbonique, déjà évoquée à propos du groupe combustible, chimie de l'hydrogène, hydrogénéation sélective, hydro-désazotation, désulfuration, activation sélective des paraffines et notamment du méthane en vue de leur fonctionnalisation.

Propriétés des milieux réactionnels

Ces réactions chimiques et les conditions énergétiques qu'elles impliquent dépendent non seulement du choix des substrats qui sont mis en œuvre, mais également du milieu dans lequel elles sont réalisées.

L'amélioration des rendements et la diminution des exigences énergétiques peuvent souvent résulter d'une étude approfondie de ces milieux réactionnels. Les axes de recherches qui devront assurer une meilleure connaissance de ces facteurs de milieu sont les suivants :

- étude du pouvoir solvatant et complexant : recherche de base sur la structure des solutions ; mise au point de nouveaux solvants spécifiques (que l'on songe aux progrès importants qui ont résulté de la découverte du diméthylformamide, du diméthylsulfoxyde, de l'hexamétopol) ; étude des phénomènes de complexation ; recherche systématique et quantitative du rôle du solvant dans les réactions de synthèse ; recherche de l'utilisation des sels fondus comme milieu réactionnel.

- nous retrouvons ici à nouveau l'étude des milieux super-acides et super-basiques, pour les réactions nouvelles et sélectives qu'ils permettent.

- recherche d'une hétérogénéité, statique ou dynamique, du milieu dont la disposition ou le niveau turbulence sont des facteurs importants de la réaction. Nous retrouvons également ici la catalyse micellaire et par transfert de phase. Toutes ces recherches fondamentales pourront être développées dans des domaines où des applications sont possibles, en particulier dans celui de l'activation des petites molécules, dans la réduction des phosphates par l'hydrogène, dans la valorisation des minéraux pauvres ou artificiels, etc...

Utilisation et imitation des micro-organismes et des enzymes

La nature nous donne l'exemple d'une infinité de réactions, même très complexes, qui sont réalisées dans des conditions parfaitement douces : à la température ordinaire, sous la pression atmosphérique, dans un solvant qui est l'eau et à un pH généralement proche de la neutralité. Cet exemple a déjà inspiré des travaux et nous avons la conviction que cet axe de recherche doit demeurer l'un de ceux que le C.N.R.S. affichera dans les années qui viennent. Indépendamment des recherches biochimiques dont l'objectif est la découverte des mécanismes de ces réactions enzymatiques et dont le génie biochimique auquel nous avons déjà fait allusion doit contribuer à valoriser industriellement les résultats, nous recommandons le développement de travaux orientés vers l'approfondissement des mécanismes d'activation en conditions quasi-biologiques. Deux modes d'activation ont déjà été cités : la catalyse par transfert de phase et la catalyse micellaire, mais il est certain que d'autres mécanismes bio-mimétiques seront découverts et permettront la réalisation de réactions d'une haute sélectivité dans des conditions optimales de consommation d'énergie. Les domaines d'application de ces réactions sont particulièrement nombreux et importants

mais je ne les développerai pas ici, car le C.N.R.S. a déjà mis en place une structure d'étude de cet axe particulier.

À la fin de sa réflexion prospective, le groupe n° 16 a constaté que, en dépit de l'extrême diversité des procédés et des opérations de l'industrie chimique, il était néanmoins possible de définir quatre axes principaux selon lesquels la recherche fondamentale méritait d'être suscitée, pour contribuer à résoudre les problèmes posés par l'économie d'énergie et de matière première.

Ces quatre axes que je rappelle :

- mise en œuvre des procédés : modélisation ; données de base ; techniques d'analyse et de séparation ; nouveaux réacteurs chimiques, biochimiques, photochimiques.
- processus catalytiques : nouveaux systèmes catalytiques ; mécanismes de la catalyse.
- milieux réactionnels : rôle des solvants ; rôle de l'hétérogénéité du milieu.
- réactions biomimétiques.

Ces quatre axes donc, pourront sembler évidents à certains, d'une grande banalité à d'autres et tels chercheurs y reconnaissent déjà l'un des thèmes de leur activité actuelle. Qu'il me soit permis de remarquer à ce propos que la définition de ces axes résulte d'une réflexion fort sérieuse à laquelle ont activement participé les représentants des principales entreprises chimiques du pays et que tout naturellement ils se sont dégagés comme les leviers par lesquels la recherche fondamentale peut aujourd'hui apporter son concours à la solution à moyen et même à court terme des problèmes de l'énergie.

Il est certain d'autre part que la plupart des thèmes retenus sont déjà l'objet de recherches plus ou moins avancées dans certains laboratoires du C.N.R.S. et de l'université : je vois là une preuve, s'il en était besoin, de l'importance et de l'utilité de la recherche fondamentale telle qu'elle est pratiquée au C.N.R.S. : que des problèmes vitaux pour le pays, se posent en matière d'économie d'énergie et de matières premières, la plupart des recherches fondamentales nécessaires sont déjà engagées et il suffira de les inciter à se développer selon tel et tel axe particulier pour que leurs retombées à court terme deviennent effectives.

C'est sur cette perspective encourageante que je termine mon rapport en souhaitant qu'il ait retenu votre attention et qu'il suscite de votre part d'intéressantes questions.

Jacques METZGER
Professeur à l'université
d'Aix-Marseille I

L'optimisation des polymères solides

La France produit plus de deux millions de tonnes de matières plastiques destinées à de grandes utilisations unitaires. La connaissance de ces produits permettrait vraisemblablement d'en optimiser leurs usages, donc d'économiser, à long terme, une part importante de ces matériaux ou de trouver une diversification d'emploi plus noble. Cet objectif suppose naturellement une étude approfondie des mécanismes de polymérisation ainsi que la connaissance structurale de ces produits liée à leurs propriétés mécaniques et électriques.

La production et l'utilisation des polymères solides concerne un secteur industriel particulièrement vaste. Il faut rappeler tout d'abord qu'il existe trois grandes classes de matériaux issus des polymères : les matières plastiques (thermoplastiques et thermodurcissables), les élastomères et les fibres textiles. En tonnage, c'est la première classe qui est de loin la plus importante et la plus diversifiée puisqu'elle comporte à la fois des matériaux de grande diffusion et des produits à hautes performances pour des applications très spécialisées. Comme ces derniers ne représentent qu'une faible fraction de l'ensemble, ce sera surtout sur les matières plastiques de grande diffusion que nous porterons la plus grande attention.

Enfin, autre caractéristique de ce secteur, le champ d'utilisation de ces matériaux est extrêmement diversifié et diffus puisqu'il porte aussi bien sur des applications industrielles que domestiques en passant par la prothèse chirurgicale ou dentaire pour ne citer que quelques cas. Les revêtements les plus divers, l'isolation électrique, thermique, acoustique,

l'emballage et plus généralement le conditionnement illustrent quelques-uns des grands domaines où les performances des polymères ont permis de sensibles améliorations technologiques.

La hausse importante du pétrole brut a conduit les autorités gouvernementales à promouvoir une politique d'économie et, comme celui-ci est pour sa plus grande partie utilisé à la production d'énergie, c'est donc sur la recherche d'économies d'énergie qu'un effort intensif est entrepris. Dans le domaine particulier des polymères, il faut cependant remarquer que le pétrole est devenu la source presque unique de matière première de base et que cette industrie est actuellement presque totalement dépendante de la pétrochimie. Dans ces conditions, la recherche des économies possibles devra porter à la fois sur les problèmes d'énergie et de matière.

Il semble également important de ne pas perdre de vue que, dans l'immédiat et pour un certain temps, la nécessité d'économiser n'est pas la résultante d'une pénurie mais une question d'équilibre de notre balance commerciale. Si la solution immédiate repose essentiellement sur la réalisation d'économies, par contre, à moyen terme, on peut penser que l'accroissement des exportations constitue une autre manière de résoudre ce problème, - probablement plus satisfaisante pour maintenir une certaine croissance industrielle nécessaire à l'économie de la nation. De ce point de vue, les polymères peuvent jouer un rôle fondamental compte tenu de leurs utilisations variées et il paraît important de pouvoir développer celles d'entre elles qui permettraient d'exporter des articles

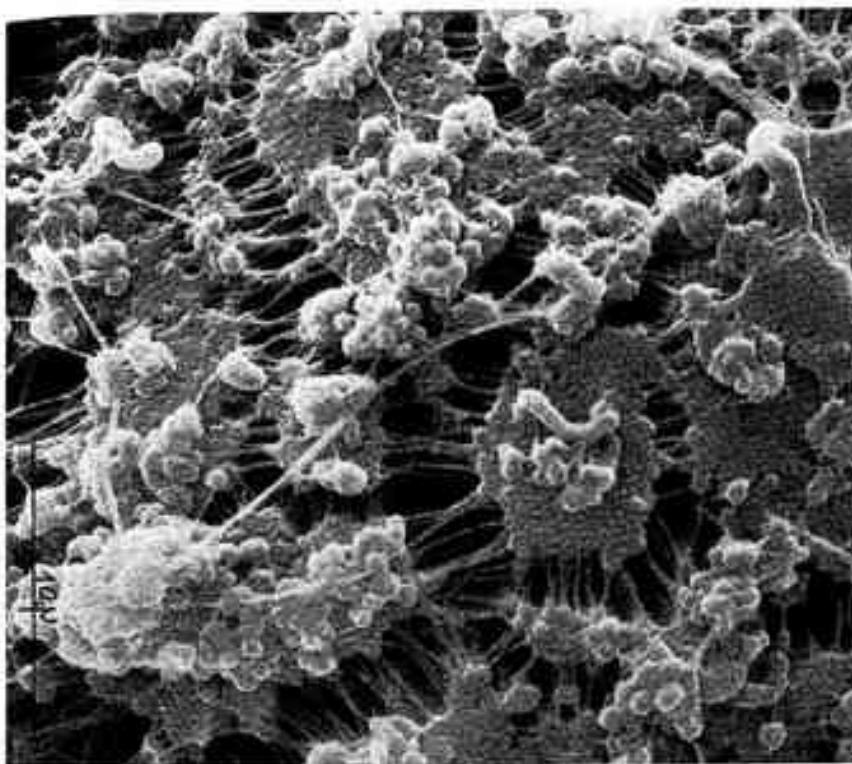
à haute valeur ajoutée. Pour cela, il est important que, sur le marché international, ces articles soient de haute compétitivité, ce qui nous amène à examiner avec attention le problème de leurs performances et donc de celles des polymères.

Ainsi, nous sommes conduits à envisager simultanément les économies d'énergie proprement dites, les économies de matière et l'amélioration des performances des polymères, ou, d'une façon plus générale, l'optimisation de leur utilisation.

Economies d'énergie

Les économies directes

Les économies directes, c'est-à-dire celles que l'on peut réaliser lors de la synthèse ou de la transformation des polymères. On s'aperçoit rapidement que, du moins dans les secteurs de production importants, les économies que l'on peut envisager risquent d'être très modestes. A titre d'exemple, l'énergie consommée pour la synthèse et la transformation des thermoplastiques est en moyenne de l'ordre de 0,6 kwh/kg. En supposant que l'on puisse réaliser une économie de la consommation énergétique de 10 %, ceci nous amènerait à l'heure actuelle à une réduction de consommation de 150 à 180 millions de kwh. Encore faudrait-il pour cela réaliser des investissements importants, spécialiser chaque atelier de transformation sur une matière donnée et ainsi faire perdre à cette industrie toute flexibilité ce qui est inacceptable. Ceci ne veut évidemment pas dire qu'il n'y a pas quelques économies possibles dans certains cas particuliers mais, sur le plan national, l'incidence sera négligeable.



Texture microscopique du polyéthylène Ziegler - Mag. 8.400

Les économies indirectes

Dans ce domaine, des résultats plus intéressants peuvent certainement être acquis dans des domaines où les quantités d'énergie consommée sont importantes et où un gain, si faible soit-il, est perçu de manière sensible. C'est le cas de l'isolation thermique et, à un degré moindre, de l'isolation électrique. Une amélioration des caractéristiques des performances des matériaux isolants, et dans cette utilisation les polymères ont une large place, par exemple pour ceux employés dans le bâtiment, se traduira par une économie sensible. Si l'on sait que techniquement des progrès sont possibles dans cette voie, il est malheureusement très difficile d'en chiffrer l'incidence avec quelque précision.

Les économies de matières

On peut envisager plusieurs voies possibles pour économiser dans ce domaine :

- Il est certainement possible de diminuer les pertes de monomères lors de la synthèse. Cependant, ces pertes sont dès à présent relativement faibles.
- Par une meilleure fiabilité des procédés de transformation, on peut espérer diminuer les seconds choix et les rebuts. On peut par ailleurs envisager de diminuer au maximum les déchets et de réutiliser ceux que l'on ne peut éviter. Cette réutilisation est déjà d'ailleurs amorcée dans certains secteurs.
- On peut diminuer les marges de sécurité, alléger certaines structures par

une meilleure connaissance des possibilités des matériaux.

- On peut accroître la durée d'usage des articles, notamment en palliant, au moins partiellement, le vieillissement des plastiques.

Dans chacune de ces voies, des économies de matières sont techniquement possibles, mais elles sont d'importance très variable selon le produit et son utilisation. Si chacune d'entre elles, prise isolément, n'est relativement pas très importante, l'ensemble des économies réalisées risque cependant d'être non négligeable par rapport à la consommation actuelle en matière brute. Là encore, compte tenu de la diversité des secteurs d'utilisation, de l'impossibilité de chiffrer sérieusement ce que, raisonnablement, on peut espérer économiser dans chaque secteur en fonction des progrès accomplis, il est pratiquement impossible d'avancer un chiffre global des économies susceptibles d'être réalisées.

L'optimisation de l'utilisation

Cette optimisation nous conduit en fait à réaliser des économies d'énergie indirectes, les économies de matières.

Mais elle doit contribuer également à améliorer la compétitivité de nos produits par l'amélioration de leurs performances. Elle interviendra aussi bien au niveau des procédés de mise en œuvre que des propriétés d'usage. À la limite, elle peut aboutir à des substitutions de techniques, par exemple dans l'assem-

blage des matériaux en généralisant les procédés de collage qui se substituent à des techniques plus dispendieuses en énergie.

Cette optimisation passe nécessairement par une meilleure connaissance des procédés de transformation, leur rationalisation par une meilleure connaissance également des caractéristiques des polymères et des matières plastiques, des relations entre les structures et les caractéristiques de ces matériaux, ce qui impliquera dans un certain nombre de cas le développement de nouveaux moyens d'investigation.

Le rôle de la recherche fondamentale apparaît ici évident : elle aura pour mission d'apporter les connaissances qui nous font actuellement défaut et de développer les moyens d'investigation.

Rôle de la recherche fondamentale propositions de grands thèmes de recherche

Après avoir examiné en détail les lacunes, en particulier en ce qui concerne les connaissances nécessaires pour réaliser des progrès dans les différents secteurs que nous venons de mentionner, notre groupe a pu donner un inventaire des besoins qui, comme il fallait s'y attendre, comporte un nombre important de problèmes de recherche qu'il serait indispensable de traiter. Néanmoins, l'ensemble de ces problèmes peut être regroupé en un nombre restreint de grands thèmes de recherche à l'intérieur desquels il conviendra de déterminer les ordres d'urgence et d'importance de ce qui n'a pu être fait compte tenu du temps qui nous était imparti.

Ces thèmes généraux sont les suivants :

- prépolymères réactifs,
- chimie des polymères à l'état condensé,
- mise au point de techniques nouvelles de caractérisation, des structures et des propriétés,
- corrélations structure-propriétés,
- comportement rhéologique (à l'état fondu, en solutions très concentrées, à l'état solide).

L'ensemble de ces thèmes représente en fait les différents grands chapitres d'une action générale de recherche portant sur l'optimisation dans la synthèse, la transformation, l'utilisation des polymères à l'état solide, à travers laquelle la recherche fondamentale pourrait apporter son concours aux grands problèmes posés à notre économie nationale par suite de la hausse des matières premières, en particulier du pétrole.

Georges VALLET
Directeur Général
du centre technique du cuir.

Thermodynamique et énergétique

Toute optimisation scientifique des techniques productrices ou consommatrices d'énergie repose sur l'édification d'un programme de recherches fondamentales s'appuyant sur la thermodynamique qui constitue dès lors, la science support essentielle de cette réflexion. En particulier, l'étude des phénomènes de combustion doit aussi tendre vers une amélioration de la protection de l'environnement.

Introduction

Les idées ou inventions nouvelles issues des laboratoires de recherches étaient, il y a encore quelques années, transférées à l'industrie qui faisait une démonstration de leurs possibilités et les appliquait à l'obtention d'un nouveau produit ; il existait donc une coupure entre la recherche et l'industrie, le transfert des connaissances ne se faisant qu'en amont. Devant les nouvelles contraintes liées au coût opérationnel minimal, à l'environnement ou à l'optimisation des systèmes avec restriction d'énergie, l'industrie fait appel aux organismes de recherches durant toute la mise au point d'un procédé ; il existe donc un contact fréquent entre la recherche la plus fondamentale et l'industrie d'où l'importance de la science pour l'ingénierie.

Les groupes de réflexion du CNRS : groupe n° 3 « combustion » et groupe n° 10 « thermodynamique et énergétique » ont essayé de tenir compte, dans l'établissement des programmes de recherches proposés, des besoins actuels de l'industrie dans le domaine des nouvelles sources d'énergie et de l'économie de l'énergie.

Le groupe n° 3 était formé de chercheurs fondamentalistes (28 %), de chercheurs effectuant des recherches appliquées

(24 %), des industriels (32 %) et des représentants des services officiels au couvrant des programmes et des actions gouvernementales (16 %).

Le groupe n° 10, dans ces différentes catégories, avait le pourcentage suivant : recherche fondamentale (22 %), appliquée (35 %), industrie (35 %), services officiels (8 %).

Le plan de notre exposé sera le suivant : après un bref rappel de la consommation en énergie, nous indiquerons les actions principales dans quatre domaines :

- cycles associés aux fluides,
 - échangeurs,
 - stockage et transfert de l'énergie,
 - combustion,
- et nous détaillerons plus particulièrement deux thèmes.
- les cycles à haut et bas niveaux de température,
 - la combustion et en particulier la modélisation des foyers.

Consommation d'énergie

Ce sujet étant abordé par plusieurs conférenciers, nous indiquerons brièvement qu'en France la source d'énergie principale provient des produits pétroliers : en 1973, 87 % de l'énergie disponible se retrouve sous forme thermique (27 % transports, 29 % dans le domaine résidentiel et commercial, 24 % dans l'industrie dont 1/3 pour le chauffage des bâtiments et 13 % se retrouvent sous forme d'électricité).

Aux U.S.A., en 1970, on note sensiblement le même pourcentage (90 % sous forme thermique et 10 % sous forme d'électricité).

Ces quelques chiffres soulignent l'importance des études sur les phénomènes thermiques – combustion – cycles – échangeurs etc...

Bref examen des sujets discutés

Cycles et fluides

Les différentes transformations d'énergie thermique en différentes formes de l'énergie peuvent être décrites sous forme de cycles dont le plus efficace, mais peu réaliste, est le cycle de Carnot, fonctionnant à deux niveaux de températures. Ces cycles interviennent à tous les stades de production, de transformation, de stockage et de transfert de l'énergie et un effort très important doit être fait pour rechercher de nouvelles combinaisons associées à de nouveaux fluides aussi bien pour les cycles à haute température que pour les cycles à bas niveau. Toute économie d'énergie repose non seulement sur l'amélioration des éléments entrant dans le cycle : compresseurs, turbines, échangeurs et foyers, mais aussi sur le groupement optimal de ces éléments. L'action de recherche doit également porter sur l'amélioration des cycles utilisant des fluides cryogéniques.

Échangeurs

Directement liées à l'énergie, les voies de recherche les plus prometteuses portent sur les machines thermiques et sur les pompes à chaleur qui permettent d'augmenter à moindre frais le niveau de température et également sur tous les problèmes liés au transport de l'énergie. Les échangeurs de masse et d'énergie jouent un grand rôle dans la conjoncture actuelle d'économie, ces échangeurs sur

Le plan industriel sont utilisés aussi bien dans les processus énergétiques que dans les processus chimiques.

Les échangeurs de masse et d'énergie sont utilisés dans de nombreuses applications de génie chimique comme la distillation, le dessalement de l'eau de mer, les échangeurs dans les réacteurs chimiques, la pollution de l'air et de l'eau, les divers types de réfrigérants à air et à eau. Ils interviennent dans l'amélioration des machines thermiques.

Les thèmes de recherches fondamentales qui se dégagent des applications des échangeurs sont tout d'abord relatifs au processus d'échange lui-même : détermination des coefficients d'échange en convection naturelle ou forcée ; analyse des échanges entre gaz et goutte ; échanges à haute température ; propriétés thermiques de fluides purs allant de gaz classiques comme l'ammoniac, l'hélium aux métaux liquides ; propriétés de fluides composites comportant des mélanges et des fluides polyphasiques ; analyse du rayonnement.

Les thèmes retenus portent également sur l'aérodynamique du système et en particulier sur l'organisation de l'écoulement.

L'efficacité des échangeurs repose aussi sur des recherches nouvelles sur les matériaux qui doivent répondre à des critères variés : tenue mécanique, tenue à la corrosion, bonnes propriétés thermiques, élimination de dépôts.

Stockage et transport

Les besoins de l'industrie dans les domaines du stockage et du transport de l'énergie sont nombreux et se situent dans différents secteurs. Tout d'abord au niveau de l'exploitation des différentes sources d'énergie : centrales thermiques et nucléaires, géothermie, énergie solaire : la mise en place des centrales nucléaires pose le problème du stockage de l'énergie à l'échelle de la journée, de la semaine et de quelques mois. Les industries sont intéressées par un stockage à petite échelle et également par des transports à des distances de l'ordre du kilomètre. Dans le secteur tertiaire et domestique, le stockage doit se faire à petite échelle et les transports sur les distances qui sont de l'ordre d'une dizaine de kilomètres. L'industrie des transports s'intéresse par contre au stockage d'énergie de faible masse volumique. De nombreux modes de stockage peuvent être envisagés : stockage mécanique : eau à différents niveaux, air comprimé ; stockage thermique (sels fondu) ; stockage inertiel ; stockage chimique – fabrication et transport d'hydrogène.

A côté de ce problème de stockage, se pose le problème de transport de l'énergie et en particulier l'amélioration du transport de la chaleur à basse tempéra-

ture pour permettre son utilisation à grande distance ; le chauffage des locaux, entre autre, occupe une position importante avec 37 millions de tonnes de fuel en 1973.

Les principaux thèmes de recherches retenus en ce qui concerne le stockage portent sur :

– le stockage thermique : enthalpie de changement d'état comme les mélanges $\text{NaF} + \text{MgF}_2$

– le stockage relatif aux eutectiques avec la recherche de nouveaux matériaux résistant à la corrosion, la recherche d'inhibiteur de surfusion, le transfert de chaleur dans la masse mixte cristaux – liquide et la stabilisation de certains mélanges.

– le stockage chimique : en mettant l'accent sur l'hydrogène et en soulignant toutefois que le développement de ce vecteur d'énergie est plus lié à ses conditions de production et d'utilisation qu'à ses performances en matière d'énergie et de transport ; d'après une étude américaine le coût du transport d'énergie par hydrogène serait dix fois moindre que par réseau H.T.

– les thèmes de recherches relatives aux transports doivent porter, comme nous l'avons signalé sur les énergies de bas niveau, le transport de gaz combustible (hydrogène) et l'utilisation de réactions endothermiques du type : $\text{CH}_4 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CO} + 3\text{H}_2$.

Combustion

Les activités industrielles intéressées par les recherches sur la combustion sont nombreuses, citons : les foyers industriels et domestiques ; les foyers utilisés en propulsion ; le traitement des déchets ; le transport de matière par déflagration et détonation ; le forage, le coupage et le soudage ; la conversion de l'énergie ; la synthèse de produits nouveaux ; les méthodes d'analyse ; la métrologie ; les incendies (forêts et bâtiments) ; la sécurité industrielle.

De cet ensemble d'activités, on peut dégager des thèmes de recherches fondamentales qui pourraient être retenus par les différents laboratoires du C.N.R.S. ou des secteurs publics et privés engagés dans ce domaine, thèmes pouvant faire l'objet d'une A.T.P. (action thématique programmée). Ces dix sujets sont les suivants :

– modélisation des foyers et des fours, – combustion en régime turbulent, – incendies (initiation, propagation des flammes et extinction)

– combustion dans les moteurs alternatifs,

– synthèse chimique par pyrolyse et combustion,

– combustion des produits lourds et des déchets (formation des phases condensées).

- propriétés électromagnétiques des flammes,
- transfert de chaleur en présence d'une flamme,
- métrologie,
- cinétique des réactions chimiques dans les flammes.

Examen plus détaillé de quelques thèmes particuliers

Pour souligner l'intérêt des sujets retenus nous voudrions détailler deux actions particulières : l'une se rapportant aux cycles, l'autre à deux thèmes mentionnés dans la rubrique combustion et relatifs à la modélisation des foyers et des fours et à la combustion turbulente.

Cycles

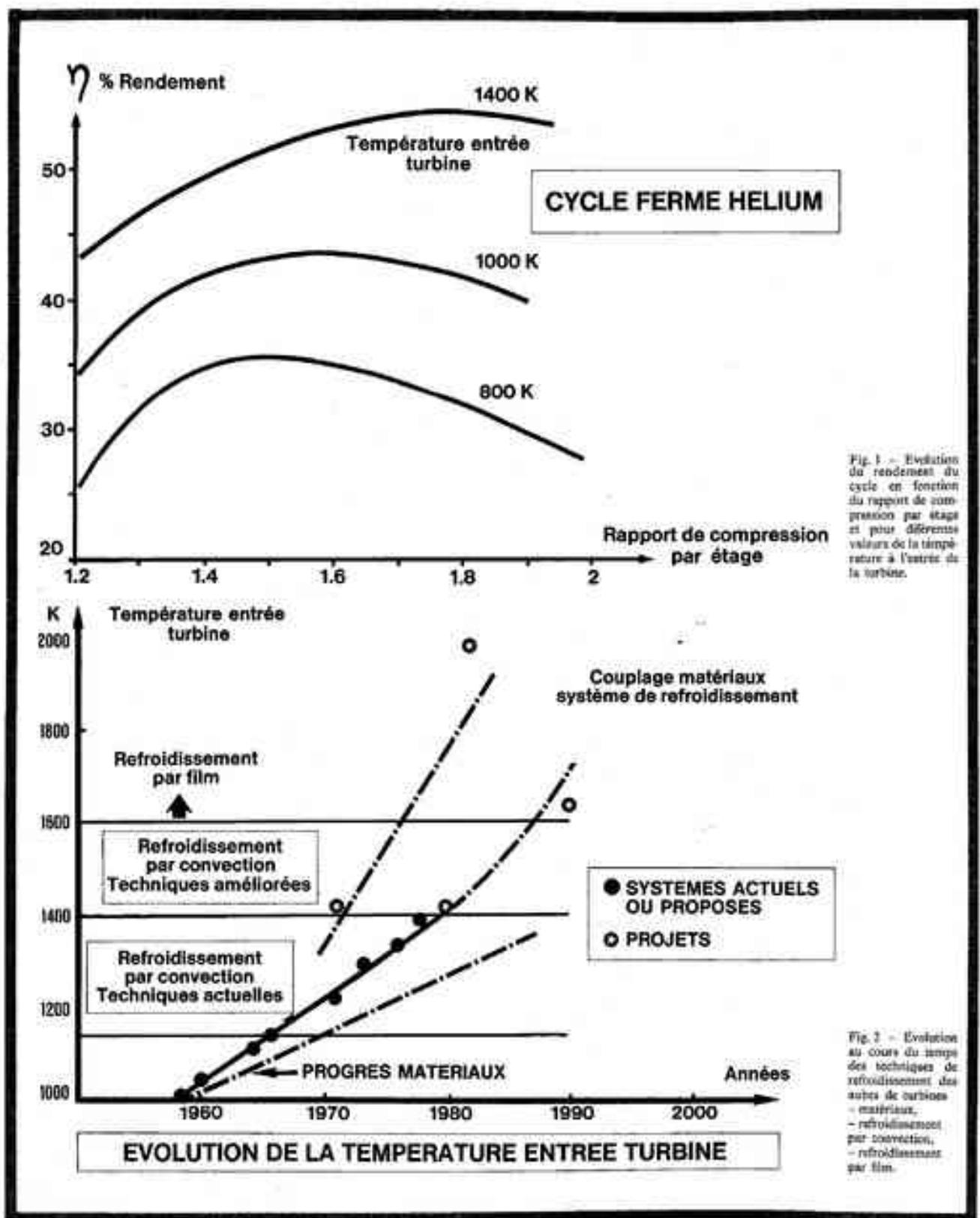
Dans le paragraphe précédent nous avons classé les cycles en cycles à haute température, cycles à bas niveau et cycles cryogéniques.

Le rendement du cycle dépend étroitement du niveau de température maximal, c'est-à-dire de la température à l'entrée de la turbine ; les températures et les pressions des turbines à vapeur ne peuvent pas être indéfiniment accrues de façon efficace, il faut donc rechercher d'autres cycles ainsi que d'autres fluides. D'une manière générale et pour un fluide approprié, le rendement du cycle augmente avec la température d'entrée turbine et pour chaque température le rendement passe par un maximum pour un rapport de compression donné. La figure 1 traduit cette variation du maximum avec la température et le rapport de compression pour un cycle fermé à hélium. Cette figure indique l'orientation des recherches pour l'obtention de cycles à haut rendement.

Dans le domaine des compresseurs axiaux ou centrifuges, il faut réaliser par étage le maximum du taux de compression, l'aérodynamique dans ce cas est très complexe car il faut éviter en particulier les décollements.

Sur le plan fondamental, les recherches sur les écoulements dans ces configurations complexes sont importantes dans le domaine théorique et expérimental.

Pour obtenir des taux de compression élevés, donc des grandes vitesses de rotation, les problèmes d'aéroélasticité, de fatigue et de matériaux sont primordiaux. Il faut en effet, pour obtenir une durée de vie acceptable du compresseur, éliminer les domaines de vibration du compresseur, réaliser des assemblages avec des matériaux et des géométries conduisant à de bonnes propriétés mécaniques. En plus des recherches que nous venons d'énumérer pour les compresseurs et qui concernent l'aérodynamique, il faut tenir



compte du fait que les turbines doivent également fonctionner à des températures élevées, d'où la nécessité de pouvoir évaluer correctement le flux de chaleur transmis à l'aubage dans le cas d'écoulement laminaire et turbulent, de concevoir des systèmes de refroidissement des aubages et de mettre au point des matériaux ayant de bonnes propriétés mécaniques aux températures rencontrées.

La figure 2 retrace l'évolution probable des techniques de refroidissement des aubes de turbines : les températures entrée turbine étant portées en fonction de l'évolution de la technologie en considérant les progrès sur les matériaux et sur

les techniques de refroidissement par convection et par film. Des progrès substantiels peuvent être obtenus par une meilleure connaissance sur le plan fondamental des techniques de refroidissement et le constructeur peut, à partir de ces résultats, optimiser son système en vue d'une application donnée.

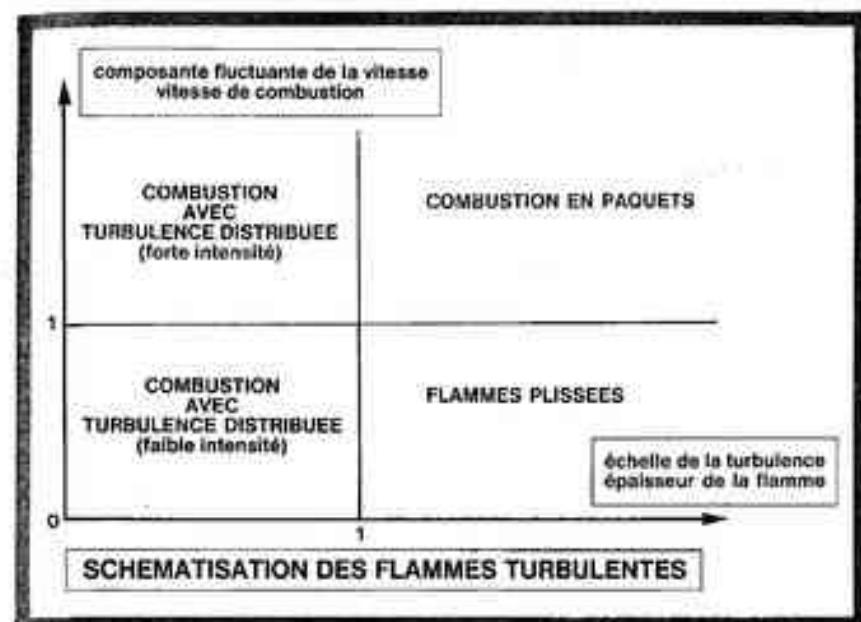


Fig. 3 - Structures des flammes dans un écoulement turbulent.

La connaissance des propriétés thermodynamiques de nouveaux fluides purs ou mélangés est également nécessaire pour l'évaluation du cycle optimal. Celle-ci repose en effet, non seulement sur les performances des éléments : compresseurs, foyers, turbines, échangeurs, mais aussi sur les propriétés thermodynamiques du fluide. Il convient en plus d'étudier le meilleur groupement de ces éléments en fonction du cycle lui-même et de l'environnement. Cet ensemble de recherches suppose des données de base sur la thermodynamique, l'économie et, comme c'est un problème d'extremum, sur le calcul des variations.

La nécessité d'une économie de l'énergie impose l'étude de cycles à bas niveau. De nombreuses industries disposent de grandes quantités d'eau chaude non utilisable qui risquent de polluer les rivières, il importe donc d'utiliser des cycles à bas niveaux pour ramener la température de l'eau de 20 à 30° et la rendre ainsi utilisable. Les pompes à chaleur peuvent contribuer à éléver cette température et donc à mieux employer cette énergie perdue : c'est le cas des colonnes de séparation et de rectification rencontrées dans l'industrie du pétrole, il est alors possible, à l'aide d'une énergie électro-mécanique, de reprendre les calories des condenseurs de tête pour chauffer les pieds de colonne.

L'utilisation des pompes à chaleur étant multiple, il importe sur un plan fondamental, d'améliorer l'efficacité de celles-ci. Cette renvalorisation des énergies de bas niveaux grâce à l'emploi des pompes à chaleur, conduit, comme dans le cas des cycles à hautes températures, à améliorer les divers éléments constitutifs de la pompe : compresseurs, échangeurs ainsi que tout l'ensemble par des études de cycles (cycles à trois températures) et

de fluides les mieux appropriés. Les recherches sur les éléments doivent porter sur leur fonctionnement dans le cas d'écoulement à deux phases.

Combustion

Parmi les recherches à développer dans le domaine de la combustion, nous avons retenu deux thèmes principaux : la modélisation des foyers et des fours et la combustion turbulente.

Modélisation des foyers et des fours – L'intérêt d'une modélisation des foyers est indéniable puisque les résultats de cette étude doivent conduire à : l'amélioration des foyers actuels ; la réduction du nombre d'essais pour la mise au point et le réglage des foyers ; la prévision de l'effet d'échelle, conduisant à une économie dans le développement ; l'optimisation du fonctionnement en tenant compte des différentes contraintes comme la pollution, le bruit et le coût de l'énergie.

Pour mener à bien cette modélisation, des étapes sont nécessaires qui, chronologiquement, peuvent se résumer comme suit : il faut tout d'abord acquérir des données de base sur le fonctionnement du foyer, puis il est nécessaire de savoir diviser le foyer suivant les diverses étapes de la combustion (injection du combustible et du comburant, préparation du mélange, évolution de la combustion turbulente) ; la conception du modèle intervient ensuite avec la schématisation des mécanismes fondamentaux ; la résolution mathématique des systèmes ainsi écrits régissant le fonctionnement du modèle est souvent délicate par suite de la présence de réactions chimiques complexes : la dernière étape, expérimentale, porte sur la validation du modèle. Ce problème qui intéresse directement l'industriel repose sur tout un en-

semble de recherches fondamentales et le couplage laboratoire de recherches-industrie est obligatoire.

Combustion turbulente – Le deuxième thème retenu concerne la combustion turbulente et l'intérêt des travaux dans ce domaine est incontestable puisque, à tous les niveaux de l'utilisation industrielle de la combustion, celle-ci a lieu en écoulement turbulent. Les résultats obtenus seront d'ailleurs directement utilisés dans la modélisation des foyers, dans la diminution du niveau de pollution, dans la réduction du bruit et dans l'accroissement de l'efficacité de la combustion.

En première approximation les différentes structures de la zone de combustion peuvent être définies en comparant, d'une part la composante fluctuante de la vitesse de l'écoulement à la vitesse normale de combustion, et d'autre part l'échelle de la turbulence, dans la zone de réaction, à l'épaisseur de la flamme laminaire. Ce domaine comme l'indique la figure 3 est divisé en quatre parties correspondant à des processus de combustion bien particuliers : flammes plissées, combustion en paquets, combustion avec turbulence distribuée de faible et de forte intensité. Ce classement constitue une première démarche pour expliquer un certain nombre de phénomènes observés mais il est nécessaire d'aller beaucoup plus loin dans l'analyse aussi bien sur le plan théorique qu'expérimental.

Thermodynamique fondamentale

Dans la conjoncture actuelle d'économie de l'énergie, la thermodynamique fondamentale prend de plus en plus d'importance et en conséquence la thermodynamique des processus irréversibles. Nous pouvons distinguer deux orientations principales :

- la détermination des pertes dues aux processus irréversibles (viscosité, réactions chimiques, etc...) ; cette détermination intéresse directement l'ingénieur dans tous les domaines qui ont été abordés aux paragraphes précédents.
- la définition et l'analyse de la stabilité des états stationnaires situés loin de l'équilibre ; il existe en effet, en dehors du cas réversible de l'équilibre, des situations particulières pour lesquelles le système est stable, ces cas se rencontrent fréquemment dans la pratique comme par exemple dans l'analyse de la stabilité d'un réacteur chimique. Cette branche de la thermodynamique relative à l'étude des processus irréversibles, par son très grand intérêt, doit retenir l'attention des fondamentalistes.

Marcel BARRERE
Directeur scientifique
de l'énergétique
à l'Office national d'étude et de recherche aérospatiale.

La fission et la fusion

Sans vouloir être trop optimiste sur l'avènement de la fusion nucléaire, il convient de définir dans le temps les divers goulets d'étranglements qui empêchent la réalisation du premier prototype industriel. Alors que la fission ne nécessite pratiquement plus d'effort en recherche fondamentale, ce n'est que grâce à cette dernière que la fusion pourra, vers l'an 2000 peut-être, devenir une réalité.

La fission a fourni un premier exemple spectaculaire de découverte, en recherche fondamentale, et qui est passé en très peu de temps du domaine des applications à une importante activité industrielle.

Cet exemple remarquable, et quelques autres notamment dans le domaine de l'électronique, ont pu faire croire qu'un tel passage rapide de la recherche fondamentale aux applications constituerait désormais la règle générale, idée qui a conduit à un certain nombre de désillusions. Pendant de nombreuses années, la recherche fondamentale est restée liée très intimement au développement de l'utilisation de l'énergie de fission. Il était nécessaire de déterminer avec précision de nombreuses constantes, des schémas de désintégration, des sections efficaces etc... et ces résultats étaient non seulement essentiels pour l'énergie nucléaire mais présentaient également un grand intérêt pour la recherche fondamentale. Ensuite l'intérêt de la physique pour les déterminations s'est estompé alors que celle-ci gardait encore de l'importance pour l'énergie nucléaire.

Les mesures étaient alors effectuées par des équipes pluridisciplinaires qui, avec un même appareillage menaient parallèlement, d'une part des expériences de recherche fondamentale et d'autre part des activités de métrologie qui étaient commandées et payées par les secteurs de l'énergie.

Puis, même ces besoins se sont fortement amenuisés, ce qui a conduit par exemple à l'arrêt des expériences de l'accélérateur à électron de 60 MeV à Saclay.

Une évolution similaire s'est produite dans les autres secteurs, la chimie, la physico-chimie, la physique du solide, l'étude des écoulements liquides et gazeux, et la situation à laquelle nous sommes ainsi parvenus est la conséquence de la maturité atteinte par l'énergie nucléaire : c'est en quelque sorte la rançon du succès. Il ne fait pas de doute cependant que les équipes de fondamentalistes du commissariat à l'énergie atomique, du C.N.R.S., ou de l'université peuvent encore apporter une contribution précieuse à la solution de certains problèmes.

Des contacts existent déjà entre technologues et fondamentalistes et, dans l'esprit de la réunion d'aujourd'hui, nous devons tout faire pour que ces contacts soient renforcés afin d'être assuré que lorsque cela sera nécessaire les concours utiles soient demandés et obtenus.

La situation est très différente dans le domaine de la fusion contrôlée. Les prescriptions d'application industrielle sont à long terme et je ne me hasarderai pas à en prédire la date avec quelque précision. Mais la fusion peut devenir une source d'énergie pratiquement inépuisable et l'une des leçons que nous a enseigné la présente crise de l'énergie est de ne pas négliger de telles possibilités, même si elles sont lointaines.

D'un autre côté, cette même crise exige un effort plus considérable pour améliorer la situation à court et moyen terme, et il est donc indispensable de définir les programmes de recherche en fusion contrôlée suivant un compromis raisonnable et réaliste.

Vous savez qu'il existe de nombreuses réactions nucléaires exothermiques. Beaucoup étaient connues avant la fission et la plupart produisent par unité de

masse une énergie mille à un million de fois supérieure à celle des réactions chimiques.

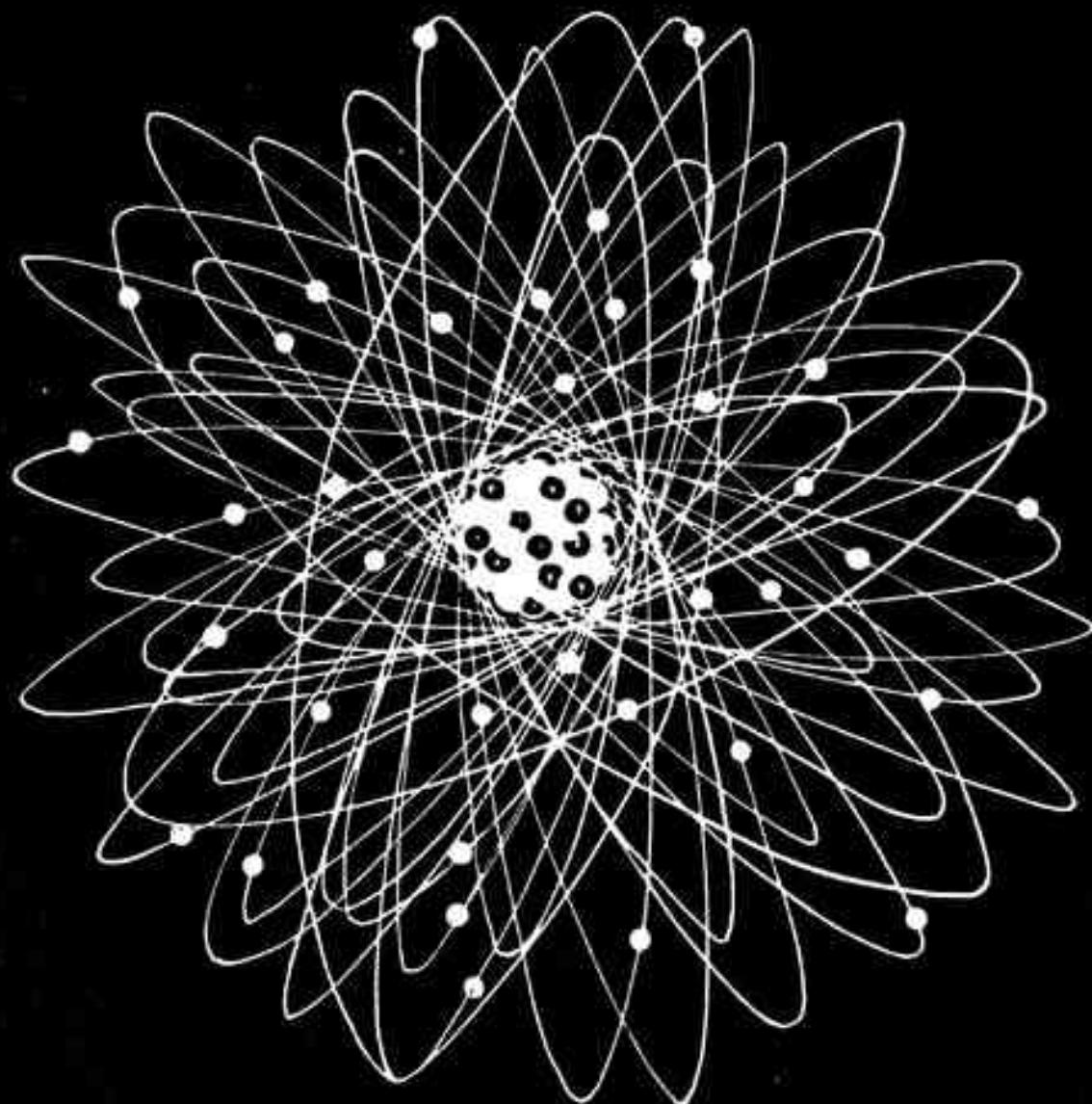
Une réaction n'est possible entre deux noyaux que s'il possède une énergie cinétique suffisante, et c'est la grande différence entre la fusion, et la fission qui fait appel aux neutrons.

Il faut donc suivre l'exemple des étoiles et provoquer la réaction dans un milieu qui est porté à une température très élevée, 100 millions de degrés. Dans le cas le plus favorable qui est celui de la réaction deutérium-tritium, la réaction exige un temps encore plus élevé et semble, tout-à-fait hors de portée.

Le problème fondamental de la fusion contrôlée est de maintenir le mélange de deutérium-tritium assez longtemps dans des conditions requises pour la combustion de façon que l'énergie thermonucléaire produite soit nettement supérieure à celle qu'il fallait fournir pour allumer le mélange ; et il faut réaliser ces conditions d'une façon contrôlée et non explosive comme dans la bombe H.

Deux possibilités principales se présentent alors : la première est l'utilisation d'un confinement magnétique, le combustible à l'état gazeux très raréfié et complètement ionisé, c'est-à-dire à l'état de plasma est maintenu pendant le temps nécessaire à la combustion par de puissants champs magnétiques qui jouent le rôle d'une paroi immatérielle, une autre possibilité envisagée plus récemment est l'utilisation d'un combustible dense subissant la fusion dans un temps plus court que le temps qu'il met à se disperser compte tenu de son inertie.

On espère réaliser une telle réaction, qui est une véritable micro explosion, en irradiant un grain de deutérium-tritium à l'aide de lasers puissants qui le compriment fortement et le porte à une température élevée.



Schema simplifié d'un atome d'uranium : électrons négatifs gravitant autour d'un noyau positif (Photo CERN)

Bien d'autres méthodes ont été proposées : compression par faisceaux intenses d'électrons au lieu de lasers, adoption de cycles brûlant du bore ce qui minimise la radioactivité, utilisation de dispositif du type anneau de collision etc. Il faut évidemment rester ouvert à des idées nouvelles, mais la concentration des programmes devient de plus en plus nécessaire en fusion et, à moins d'arguments vraiment très convaincants, il ne semble pas possible d'engager un effort un peu notable dans une voie entièrement nouvelle.

Où en sommes-nous aujourd'hui dans la voie du confinement magnétique ? Les

lois physiques fondamentales sont connues mais les phénomènes sont très complexes et on ne sait prévoir encore de façon sûre et détaillée le comportement d'un plasma dans un dispositif de caractéristiques données.

Corrélativement, il n'existe pas encore de dispositif réalisant des conditions physiques proches de celles qu'il faudra atteindre dans un réacteur à fusion. La prochaine étape que l'on espère franchir vers la fin de cette décennie est donc celle de la compréhension complète des phénomènes et elle peut se concrétiser par la démonstration expérimentale de ce qu'on appelle la faisabilité physique du procédé.

Des progrès notables ont été accomplis récemment dans le confinement magnétique et la configuration la plus prometteuse semble être la configuration tonoïdale imaginée par les Russes et appelée TOKOMAK. L'appareil le plus performant actuel est le TOKOMAK de Fontenay-aux-Roses qui a été construit en association par le commissariat à l'énergie atomique et l'EURATOM.

Pour donner une idée un peu vague, sans entrer dans les détails, on peut utiliser un critère qui indique ce qu'on devra réaliser pour avoir un bilan vraiment positif ; ce critère nous dit que le produit de la densité en nombre d'ions par centri-

mètre cube multiplié par le taux de confinement de l'énergie devait être de l'ordre de 10^{18} . Aujourd'hui avec l'appareil de Fontenay-aux-Roses, on est à un facteur 100 au-dessous de la limitation du temps de confinement, et d'ailleurs dû essentiellement à la taille limitée du dispositif, et au refroidissement du plasma qui en résulte avec l'interaction dans la paroi.

Pour exprimer cela en termes financiers, je dirai que le **TOKOMAK** de Fontenay-aux-Roses nous a coûté, sans frais de personnel, une vingtaine de millions de francs d'aujourd'hui alors que le grand dispositif européen qui est envisagé maintenant coûte 600 millions de francs, frais de personnel compris.

Avant de revenir, avec un peu plus de détails sur le programme envisagé jusqu'en 1980 et qui est en discussion au niveau européen, je voudrais évoquer rapidement les étapes suivantes, une fois que la faisabilité physique sera démontrée pour nous donner une idée du chemin qu'il restera encore ensuite à parcourir en rappelant quelques données.

Le deutérium est une matière première abondante, environ 1/7 millième de l'hydrogène naturel et est relativement bon marché. Le tritium, au contraire, est un liquide artificiel et sa production dans les réacteurs à fission est coûteuse. Heureusement, le tritium brûlé dans un réacteur à fusion peut être regénéré et même surrégénéré. A cette fin, on entoure la zone de fusion d'une couverture de lithium, la réaction des neutrons sur le lithium produira alors la surrégénération nécessaire et finalement les matières premières pour la fusion seront le deutérium d'une part, et le lithium très abondant et bon marché d'autre part. C'est également dans cette couverture que se dégagera l'essentiel de la chaleur qu'il faudra ensuite transformer en électricité par les procédés habituels. Un réacteur à fusion aura nécessairement une puissance unitaire élevée au moins de l'ordre de cinq gigawatts et la chambre de combustion sera un corps d'environ vingt mètres de diamètre. On devra donc réaliser dans un volume très grand un champ magnétique intense et ces matériaux seront soumis à un rayonnement intense.

Après la démonstration de la faisabilité physique il faudra, pendant la prochaine décennie réaliser plusieurs dispositifs permettant de tester les solutions techniques de l'ensemble du problème que je viens d'évoquer et, en cas de réussite, c'est peut-être vers 1995 que l'on pourra disposer d'un véritable prototype produisant de l'électricité.

Au-delà de l'an 2000, la place que prendra la fusion dans la production d'énergie dépendra évidemment du succès technique du programme et d'autre part des perspectives économiques, et ces deux facteurs sont très liés au développement de la technologie dans certains domaines. Ainsi pour la fusion par confinement magnétique, le dispositif des aimants supraconducteurs jouera un rôle essentiel et des considérations analogues s'appliquent évidemment à la fusion par laser dans des domaines un peu différents.

Je voudrais maintenant revenir sur les propositions de programme, d'ici 1980, dans les domaines du confinement magnétique

Dans la communauté européenne, les recherches s'effectuent dans le cadre d'associations avec l'EURATOM dont la contribution financière est de l'ordre de 24 % et peut aller jusqu'à 44 % pour certains équipements jugés prioritaires. En France, c'est le commissariat à l'énergie atomique qui est associé avec l'EURATOM. En Allemagne, ce sont les deux centres de Garching et Julich.

En Grande Bretagne le laboratoire du commissariat à l'énergie atomique anglais de Colam.

La concertation entre les associations s'est beaucoup améliorée mais les doubles emplois restent encore à déplorer.

En 1975, l'ensemble des dépenses dans la communauté sera de l'ordre de 70 millions d'unités de compte (une unité de compte = 6 F environ) et l'association entre le C.E.A. et l'EURATOM représente un peu moins de 20 % et elle est du même ordre de grandeur que le budget de l'association anglaise, le programme allemand est à peu près le double du nôtre et, en dehors de ce budget, le programme de technologie de réacteur de fusion coûte 20 millions de marks par an.

Aux Etats-Unis, le programme américain vient de subir une accélération considérable. Aussi il est nécessaire, pour progresser, de construire de grands dispositifs très complexes qu'aucune association dans la communauté ne pourrait envisager à elle toute seule. Pour cette raison, un groupe d'étude d'un grand TOKOMAK européen a été mis sur pied à la fin de 1973. Le coût est estimé à environ 100 millions d'unités de compte, c'est-à-dire environ 600 millions de francs et la décision de construction devrait être prise l'année prochaine.

Cette entreprise, même si on pense à un accroissement relativement modeste du programme, en serait la pièce essentielle mais devrait être complétée par différents programmes d'accompagnement,

en particulier pour étudier les problèmes d'interaction avec les parois, de chauffage du plasma, etc. mais, si l'on veut, dans un contexte réaliste, mener un tel programme, il faut concentrer les efforts et en particulier abandonner un certain nombre de voies.

Quelle peut être la participation dans un tel programme des laboratoires du C.N.R.S. et de l'université. Je dois dire qu'une question analogue nous est posée par les laboratoires du commissariat à l'énergie atomique extérieurs au département de fusion, par des équipes de spécialistes de matériaux de neutronique, de supraconductivité etc... et qui estiment, en évoquant l'exemple américain et même l'exemple allemand, pouvoir apporter une contribution indispensable à un tel programme. Tout dépendra des moyens financiers qui pourront être affectés à la fusion sur le plan national. Le progrès de la fusion exige que des équipes et des spécialités nouvelles soient associées aux travaux, mais ceci se traduira fatallement par une dispersion dans un grand nombre d'activités sous-critiques si le volume global des moyens financiers n'évolue pas en conséquence.

La délégation générale à la recherche scientifique et technique organise pour la fin janvier un colloque sur la fusion contrôlée et ses différentes voies d'accès ce qui contribuera à intensifier un dialogue déjà commencé.

Il ne me reste guère de temps pour parler de l'utilisation du laser en vue de la fusion, utilisation qui suscite depuis deux ans environ un intérêt particulier et des espoirs bien qu'on en soit encore à chercher à comprendre les phénomènes physiques de base. Ces recherches bénéficient de l'effort consacré aux laser de puissance pulsée encore que des études spécifiques soient nécessaires en vue d'obtenir des caractéristiques plus particulièrement adaptées à la création d'un plasma dense.

Les compétences scientifiques et techniques nécessaires dans cette voie sont assez différentes de celles qui existent dans les équipes étudiant le confinement magnétique. On peut dire qu'on se trouve devant des études à objectifs variés, applications militaires, séparation isotopique, fusion contrôlée, réactions chimiques, dont l'aspect laser est pour l'instant l'élément unificateur essentiel.

Jules HOROWITZ
Directeur délégué
à la mission recherche fondamentale

L'hydrogène

L'hydrogène, combustible par définition non polluant, paraît devoir être le combustible idéal des années 2000. Pendant encore de longues années, ce corps sera obtenu par la décomposition d'hydrocarbures. Les contraintes subies par ces derniers, nous amènent donc à réfléchir à une possibilité d'obtention d'hydrogène à partir de procédés basés sur l'électrolyse et sur la décomposition thermochimique de l'eau.

Pour un pays industrialisé comme la France, ne disposant ni comme les Etats-Unis de vastes réserves de schistes pétrolifères, ni comme l'URSS ou la Grande-Bretagne d'un approvisionnement national en hydrocarbures, ni comme l'Allemagne Fédérale d'importantes ressources en charbon, la part de l'énergie nucléaire dans l'énergie primaire est appelée à croître sensiblement dans les décades à venir.

L'énergie nucléaire doit être mise à la portée de l'utilisateur de manière souple et commode et avec un rendement énergétique aussi élevé que possible. La première solution qui vient à l'esprit est naturellement la conversion de l'énergie nucléaire en courant électrique. Mais pour des raisons à la fois théoriques (cycle de Carnot) et pratiques (perte d'une partie des calories basse température récupérables), le rendement énergétique par rapport à la production thermique des réacteurs à eau pressurisée actuellement utilisés ne dépasse pas 30 ou 35 %. Cet inconvénient se double d'un autre : alors que le réacteur nucléaire fonctionne en continu, la production d'énergie électrique doit être modulée en fonction de la consommation. Celle-ci subit de fortes fluctuations : par incidence croissante, sous-consommations nocturnes, de fin de semaine et d'été. Le stockage sous forme de batteries impliquerait des investissements considérables (faibles densités volumiques), le stockage mécanique ne saurait présenter qu'un intérêt ponctuel (remontée des lacs de montagnes).

La solution à court terme de ce problème d'adaptation de la production d'énergie à la demande est naturellement l'utilisation d'électrolyseurs susceptibles de dissocier l'eau en milieu alcalin en hydrogène et en oxygène. Ceux-ci restitueraient ultérieurement du courant aux heures de pointe en se recombinant sous forme d'eau soit dans des brûleurs classiques soit, une fois celles-ci mises au point, dans des piles à combustibles. Mais cette double opération entraîne nécessairement une diminution sensible du rendement énergétique global. Entre le réacteur et la cellule d'électrolyse s'intercalent une turbine, un alternateur et un redresseur de courant ; le rendement de l'électrolyse est inférieur à l'unité à cause de la dégradation par effet Joule et des surtensions aux électrodes : la consommation spécifique est aujourd'hui de 5 kWh environ par m³ H₂ normalisé, alors que sa valeur théorique est de l'ordre de 3 kWh. Le rendement énergétique global de la production nucléaire d'hydrogène dans l'état actuel de la technologie est donc inférieur à 20 %. Le problème se complique encore du fait que le courant électrique ne saurait être le seul vecteur d'énergie utilisable à partir des réacteurs. Le gaz conservera un rôle important : il comporte un certain nombre d'usages spécifiques, comme carburant industriel en particulier, son stockage est aisé, son transport par gazoduc beaucoup moins coûteux à énergie égale que celui du courant, surtout à grande distance. Mais actuellement la consommation de gaz double tous les dix ans environ, une fraction croissante est importée. Le gaz pourrait être enrichi de 10 à 15 % d'hydrogène sans que se pose aucun problème ni de distribution ni de réglage ; dans un second temps, la création d'un réseau de distribution d'un gaz riche en hydrogène – à grand débit en raison de son plus faible pouvoir calorifique – ne se heurterait d'ailleurs qu'à des difficultés relativement mineures. La production d'hydrogène à grande échelle

avec un rendement élevé est l'inévitable corollaire d'une politique de diversification des ressources en énergie primaire et de développement de l'énergie nucléaire.

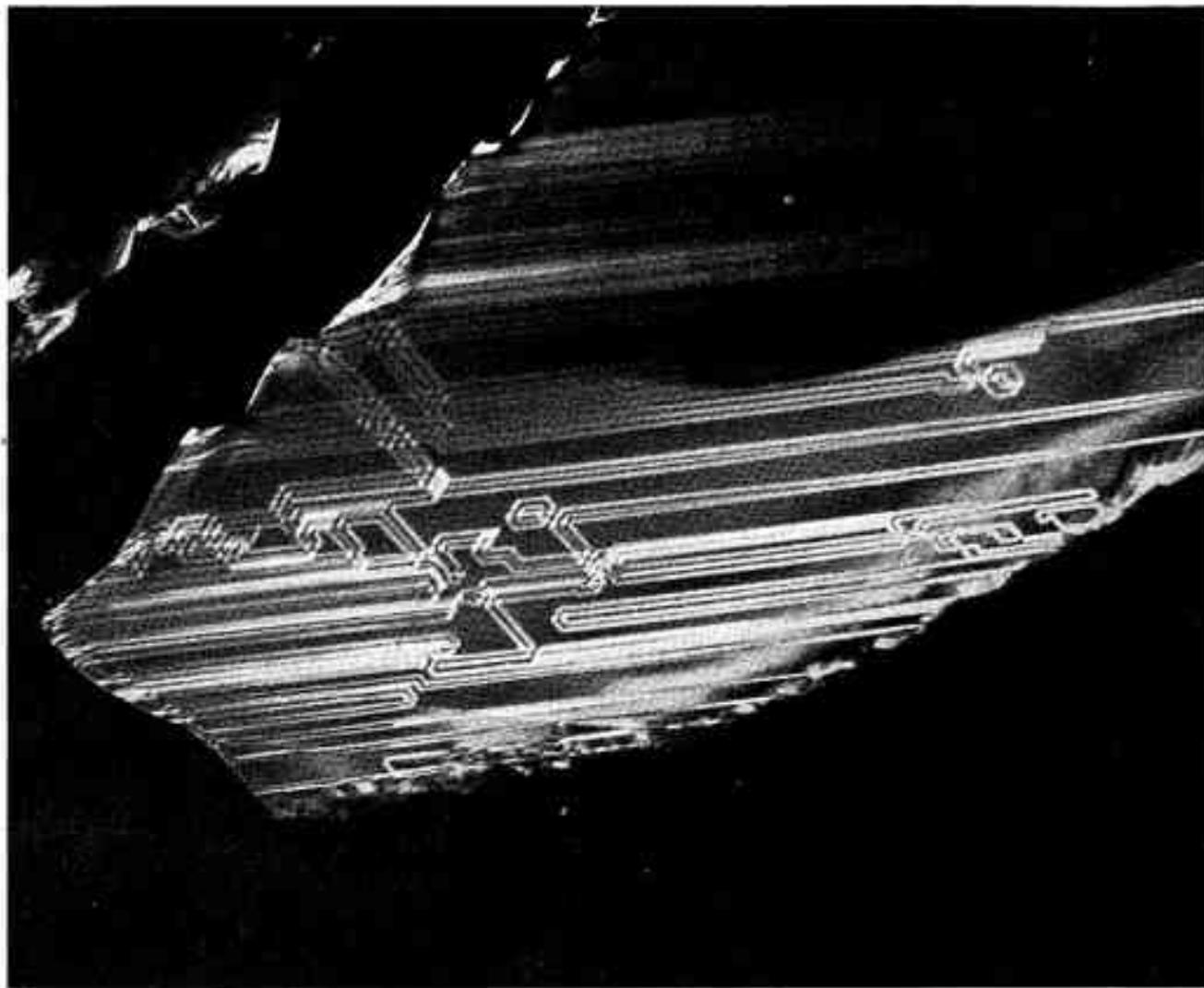
A cet aspect énergétique s'en ajoute un autre, plus spécifique : l'hydrogène est une matière première industrielle, dont le rôle ne cesse de croître. Il est à la base de la synthèse de dérivés comme l'ammoniac, pierre anglaise d'une politique agricole nationale, le méthanol ou le cyclohexane. Il pourrait permettre de transformer le charbon, dont la France n'est pas totalement démunie, en hydrocarbures lourds, donc de réorienter le raffinage du pétrole vers des fractions plus légères. Parmi les applications potentielles figurent, par exemple, la réduction non carburante des minerais de fer, dont les avantages, mis en évidence par des recherches récentes, pourraient être considérables.

En fait pour l'essentiel, l'hydrogène est actuellement fabriqué soit par oxydation ménagée du fuel lourd soit par steamer reforming des fractions légères du pétrole ou du gaz naturel. Autrement dit sa production est liée aux fluctuations du marché mondial des hydrocarbures.

Deux voies peuvent actuellement être envisagées pour une production nationale d'hydrogène à moyen ou à long terme basée sur l'énergie nucléaire. L'une et l'autre font appel à la décomposition de l'eau, matière première qui existe en quantité illimitée et qui se reconstitue d'ailleurs lors de la combustion de l'hydrogène. Les deux processus sont :

- l'électrolyse à moyenne ou haute température,
- la décomposition de l'eau dans des cycles d'oxydo-réduction.

Ces deux modes de fabrication, qui sont encore au stade de la recherche, visent l'un et l'autre à rapprocher les rendements énergétiques par rapport à la production thermique des réacteurs de ceux d'un cycle de Carnot.



Laboratoire de chimie appliquée de l'état solide. Micrographie électronique montrant les défauts observés dans un monocristal d'alumine bêta (échelle 3 cm = 2 000 Å).

L'oxygène formé en même temps que l'hydrogène peut être utilisé soit pour sa combustion ultérieure soit comme matière première de l'industrie chimique (synthèse de l'acide nitrique, blanchiment, etc...).

Electrolyse à moyenne ou haute température

Les deux principaux inconvénients des dispositifs d'électrolyse actuels sont l'apparition de surtensions aux électrodes et les densités de courant relativement faibles. Les deux phénomènes sont d'ailleurs liés : un accroissement de densité entraîne la formation de bulles gazeuses aux électrodes qui augmentent la surtension. L'optimum correspond à des tensions aux bornes de l'ordre de 2 v et des densités de courant proches de 0,2 A/cm². Pour permettre une production de courant importante de telles densités supposent des installations considérables.

Pour réduire la taille des unités de production, la solution préconisée est une

augmentation de température, l'électrolyse s'effectuant alors sous pression. Un accroissement de température est bien entendu favorable du point de vue thermodynamique (augmentation du terme entropique), il permet surtout de diminuer les surtensions tout en accroissant simultanément les densités de courant. C'est ainsi que la firme Allis-Chalmers a obtenu à 120°C sous pression de 21 kb une densité de 0,86 A/cm² avec une production ramenée aux conditions standard de 246 dm³ H₂ par kWh (production théorique à 25°C pour 1 bar : 340 dm³). De telles performances pourraient certainement être améliorées par accroissement de température et de pression, par un meilleur choix des électrodes poreuses (abaissement des surtensions, résistance à la corrosion), mais également des séparateurs utilisés, dont les durées de vie sont encore très insuffisantes.

Un progrès plus radical encore pourrait être obtenu par électrolyse de la vapeur d'eau au-dessus de 800°C en présence d'électrolyte solide (zircone stabilisée).

À 1 000°C la production spécifique serait théoriquement de 440 dm³ H₂ par kWh ramenés aux conditions standard, avec une densité de courant de l'ordre de quelques A/cm². Le rendement énergétique à partir de l'énergie thermique du réacteur avoisinerait alors 80 ou même 90 %. Mais de tels dispositifs supposent encore un effort de recherche considérable pour dépasser le stade actuel du laboratoire.

Décomposition de l'eau par cycles d'oxydo-réduction

La fabrication électrolytique de l'hydrogène se heurte à une objection majeure : alors que la production d'énergie à partir du réacteur est limitée de toute manière par le cycle de Carnot, est-il raisonnable d'abaisser encore son rendement par l'utilisation de dispositifs de dissociation de l'eau exigeant le passage intermédiaire par le courant électrique ?

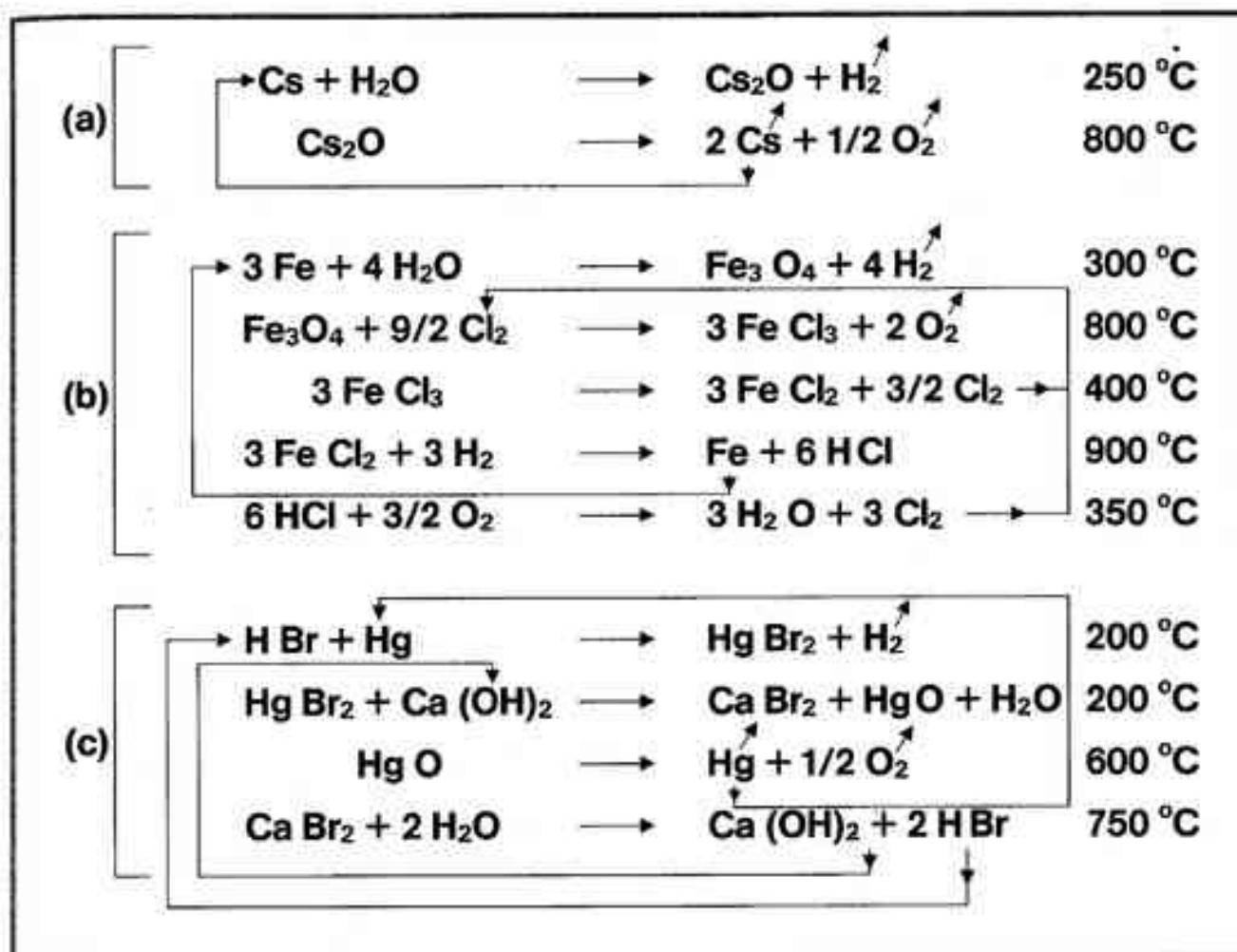


Fig. 1 – Exemples de cycles d'oxydo-réduction possibles pour la fabrication d'hydrogène.

Cette remarque semble d'autant plus opportune qu'une partie de l'hydrogène produit servira par la suite à reformer de l'énergie électrique.

Un certain nombre de centres de recherches (Euratom, GDF, Aix-la-Chapelle, General Electric, etc...) ont proposé la décomposition directe de l'eau par cycles thermochimiques permettant de transformer sans étape intermédiaire l'énergie nucléaire en énergie chimique ($\text{H}_2 + 1/2 \text{O}_2$). De tels cycles, pour être opérationnels, supposent l'existence d'un point chaud nettement supérieur à celui des températures limites atteintes par les réacteurs à eau pressurisée. Des températures dépassant 650°C pourraient être atteintes dès à présent à l'aide des filières HTR à cœur d'oxydes d'uranium réfractaires utilisant un gaz inert, l'hélium, comme caloporteur, de sorte que des rendements globaux supérieurs à 50 % pourraient être espérés, si le rendement thermochimique avoisinait celui d'un cycle de Carnot.

La figure 1 donne quelques exemples de cycles d'oxydo-réduction qui ont fait l'objet de calculs thermodynamiques et d'essais de laboratoire. Dans les deux premiers, brevetés respectivement par la

firmes aerojet general corporation et à l'université d'Aix-la-Chapelle, l'oxydation par la vapeur d'eau avec libération d'hydrogène s'effectue à basse température, le réducteur est régénéré à haute température. Dans le troisième, proposé à ISPRA, la dissociation de l'eau se produit à haute température, la formation d'hydrogène à basse température s'effectuant par l'intermédiaire du bromure d'hydrogène HBr .

En fait l'obtention de rendements importants pose de sérieux problèmes. Il est nécessaire en effet d'obtenir des pressions d'hydrogène élevées, si on désire que le fonctionnement du cycle soit aussi proche que possible d'une opération en continu. Il en résulte un problème cinétique d'autant plus délicat que les étapes du cycle sont plus nombreuses, les flux massiques plus élevés et les contacts aux interfaces plus difficiles à assurer. Les problèmes de matériaux sont particulièrement sérieux dans la mesure où les réactifs sont aussi corrosifs pour les métaux ou les oxydes que les oxydes alcalins (exemple a) ou les halogénures d'hydrogène (exemple b ou c). Une étude menée conjointement par le CEA et GDF a montré que le courant

d'hélium secondaire jouant le rôle de caloporteur pour le cycle chimique pouvait influencer très sensiblement le rendement : l'élévation de 550° à 700°C de la température basse de l'hélium accroît celui-ci de 50 %, alors qu'il ne varie que très faiblement avec la température du point chaud du circuit. C'est dire que l'utilisation de cycles d'oxydo-réduction pour la fabrication de l'hydrogène, si tentante soit-elle pour l'avenir, reste un problème difficile, qui demandera non seulement un effort très sérieux de recherche fondamentale et appliquée, mais des études technologiques importantes susceptibles de modifier la manière même dont le problème est posé.

Il n'est pas sans intérêt de préciser ici que l'utilisation de cycles d'oxydo-réduction pour fabriquer l'hydrogène par décomposition de l'eau n'est pas nécessairement liée à l'emploi d'un réacteur nucléaire. La source chaude pourrait résulter d'une concentration d'énergie solaire. Une telle méthode permettrait d'atteindre des températures très supérieures à celles des parois chaudes des réacteurs HTR, donc de faire appel à des cycles beaucoup plus commodes et de rendement plus élevé.

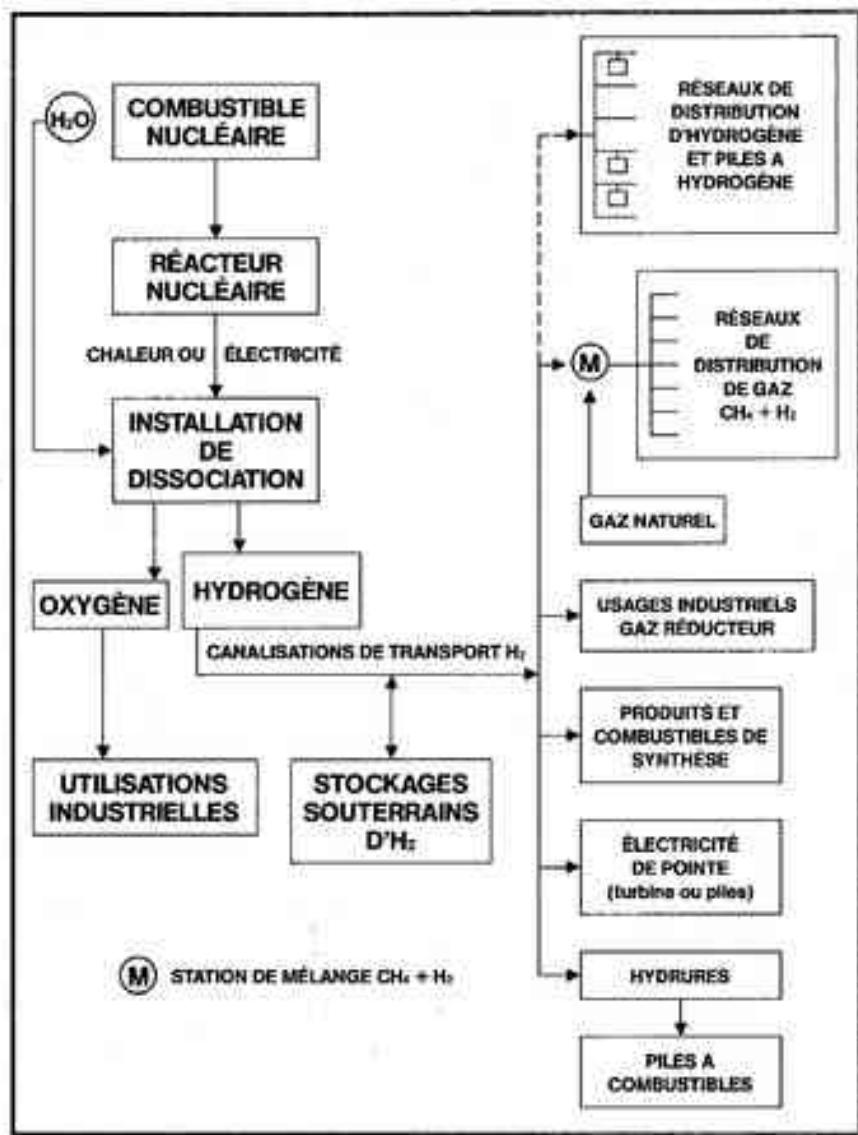


Fig. 2 - Schéma de distribution de l'hydrogène.

Les problèmes de stockage et de distribution

Nous avons vu précédemment que la distribution de gaz naturel légèrement enrichi en hydrogène pourrait s'effectuer sans modification grâce au réseau actuel de GDF. Le transport de grandes quantités d'hydrogène par sous pression de l'ordre de 80 bar nécessitera en revanche la mise en place d'un réseau de canalisations de large section et une modification de l'espacement et de la puissance des stations de pompage liée aux propriétés physiques particulières de l'hydrogène. Aucun problème fondamental ne se posera cependant. Le stockage sous pression de plusieurs milliards de mètre cube d'hydrogène s'effectuera dans des conditions analogues à celles du gaz naturel en nappes aquifères ou en cavités salines évidées par lessivage.

Compte tenu des pouvoirs calorifiques des deux gaz et de la nature des équipements utilisés, le stockage et la distribution de l'hydrogène ne coûteront que le double environ de ceux du méthane. Le coût du transport de l'hydrogène restera néanmoins très inférieur à celui de l'électricité (sensiblement le dixième par exemple pour une distance de 1 000 km). La figure 2 donne un schéma des divers modes de distribution qu'on peut prévoir lorsque l'hydrogène sera produit à un prix suffisamment bas à partir de l'eau pour être compétitif.

Un effort de recherche devra être entrepris pour la distribution de l'hydrogène à partir d'unités isolées ou mobiles (trains). C'est le problème des hydrures réversibles susceptibles de fixer des quantités d'hydrogène relativement importantes (LaNi₅ par exemple est apte à fixer une quantité d'hydrogène double à volume égal de celle obtenue par liquéfaction) et de les restituer par dépression

ou légère élévation de température. Plusieurs types d'hydrures ont été envisagés (hydrures ternaires de magnésium, des éléments de transition, des terres rares en particulier) : l'objectif n'est pas seulement de fixer le maximum d'hydrogène par unité de volume ou même de masse, il est également d'obtenir des cycles réversibles de grande fiabilité, de détecter les niveaux de vapeur d'eau à partir desquels se produisent les phénomènes de contamination par formation d'oxydes. L'une des applications actuellement étudiées est la fixation d'hydrogène sur des alliages jouant le rôle de cathodes d'électrolyse susceptibles de restituer en heures de pointe le gaz fixé en heure creuse qui serait alors brûlé en pile à combustibles. Il semble qu'une meilleure connaissance des hydrures réversibles passera par une étude plus approfondie de la liaison métal-hydrogène dans des composés.

Il n'est pas douteux que, s'il est produit à bon marché et à un prix qui échappera aux fluctuations du marché, l'hydrogène sera appelé à jouer un rôle croissant dans les années à venir tant à cause de son rôle dans l'industrie chimique, où son action comme réducteur non polluant est certainement appelée à se développer, que comme substituant progressif du gaz. Ce choix paraît d'autant plus opportun que pas plus l'hydrogène que l'eau, dont il sera issu, ne sont ni polluants ni toxiques. Contrairement à une opinion abusivement répandue, les limites d'explosion des mélanges de l'hydrogène avec l'air sont plus étroites que celles que donnent des gaz aussi usuels que le propane ou le butane. Une plus grande diffusivité et un moindre pouvoir calorifique limitent également les risques d'emploi. Faut-il d'ailleurs rappeler que la ville de Bâle est chauffée depuis de nombreuses années par un gaz qui contient 80 % d'hydrogène et que l'industrie chimique a acquis une large expérience dans l'utilisation de l'hydrogène à quelques centaines de degrés et sous des pressions souvent très élevées sans que se produise jamais aucun accident ? On peut admettre raisonnablement, si un effort de recherche suffisant est entrepris dès à présent, que la consommation d'hydrogène représentera la moitié environ du gaz utilisé en l'an 2000 qu'on peut chiffrer à 25 % environ de l'énergie primaire (soit 500 à 700 Gt/an sous forme H₂). Une telle quantité équivaudrait annuellement à 60 millions environ de tonnes de pétrole importées, l'équivalent d'une vingtaine de milliards de francs actuels. L'enjeu se passe de commentaires.

Paul HAGENMULLER
directeur du laboratoire
de chimie du solide

L'énergie électrochimique

L'utilisation de l'énergie électrochimique fut pendant de nombreuses années limitée au stockage de l'énergie électrique à l'aide d'accumulateurs et à l'électrolyse industrielle. La crise de l'énergie oblige cette science à prendre de nouvelles options afin d'améliorer la technologie existante en vue d'économiser de l'énergie, mais aussi de concevoir de nouvelles méthodes de stockage et de génération d'énergie.

ces problèmes se poseront d'autant plus que l'on envisagera une intensification des recherches pétrolières off-shore. Enfin les problèmes de corrosion sont, on le sait, très préoccupants au niveau des échangeurs de chaleur dans les réacteurs nucléaires.

• Deuxième secteur : les procédés électrochimiques consomment actuellement un peu plus de 10 % de l'énergie électrique délivrée par EDF (soit

peut être très bas. Ainsi le chromage s'effectue avec un rendement de 0,1, ce qui provoque une perte de plus de 600 Gwh/an.

• Troisième secteur : il s'agit des nouveaux procédés d'électrosynthèse. Actuellement, la plupart des produits de synthèse sont obtenus par thermo-chimie. Dans la mesure où le Kwh pourra être un vecteur énergétique privilégié dans les prochaines décennies, on peut envisager que l'activation des réactions soit effectuée non plus par apport de chaleur mais par apport d'énergie électrique : il s'agit alors d'une synthèse électrochimique. Aux avantages de rendements plus élevés s'ajoute la grande sélectivité des procédés électrochimiques. De ce fait, le développement de nouvelles synthèses électrochimiques se fera vraisemblablement d'abord en chimie organique en vue de l'élaboration de molécules de structure complexe (notamment dans l'industrie pharmaceutique).

• Quatrième secteur, sans doute le plus important : stockage et conversion de l'énergie. Deux objectifs principaux apparaissent :

- l'hydrogène constituera dans les prochaines décennies un vecteur énergétique privilégié. Dans ces conditions l'électrochimie intervient au niveau de la production de H_2 par électrolyse et au niveau de sa consommation dans des piles à combustibles air-H₂ pour redonner de l'énergie électrique. Ces piles pourraient constituer de petites centrales fixes (quelques MW), se substituer à des groupes électrogènes ou alimenter des véhicules sous la forme de sources mobiles ;

- le Kwh étant également un vecteur noble de l'énergie, il s'agit d'en assurer, pour plusieurs utilisations, le stockage dans des accumulateurs électrochimiques : stockage lors de discontinuités dans le niveau de consommation (périodes creuses de courte durée) ; stockage

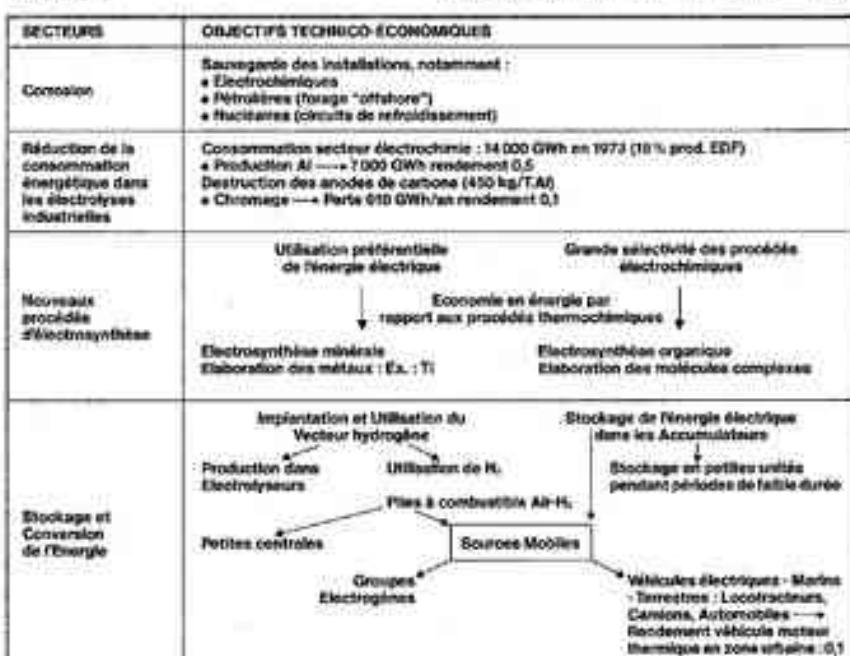


Fig. 1

Un examen des secteurs d'intervention de l'électrochimie en matière d'énergie en énergie (fig. 1), nous amène à définir quatre secteurs principaux :

• Le premier secteur rassemble les problèmes liés à la corrosion. Sauvegarde des installations existantes dans l'industrie chimique mais également problèmes liés au développement de nouveaux électrolyseurs et nouveaux générateurs électrochimiques. Par ailleurs

14 000 Gwh en 1973). Or le rendement de l'ensemble de ces opérations est très loin de l'unité. Ainsi l'électrolyse de l'aluminium s'effectue avec un rendement global de l'ordre de 0,5 soit 3 500 Gwh perdus annuellement. A cela s'ajoute, dans ce cas, la perte de 450 kg d'anode en carbone par tonne d'aluminium produit. D'autres procédés électrochimiques consomment en valeur absolue moins d'énergie mais leur rendement

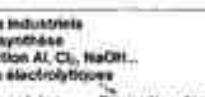
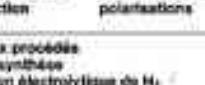
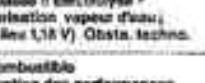
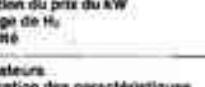
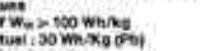
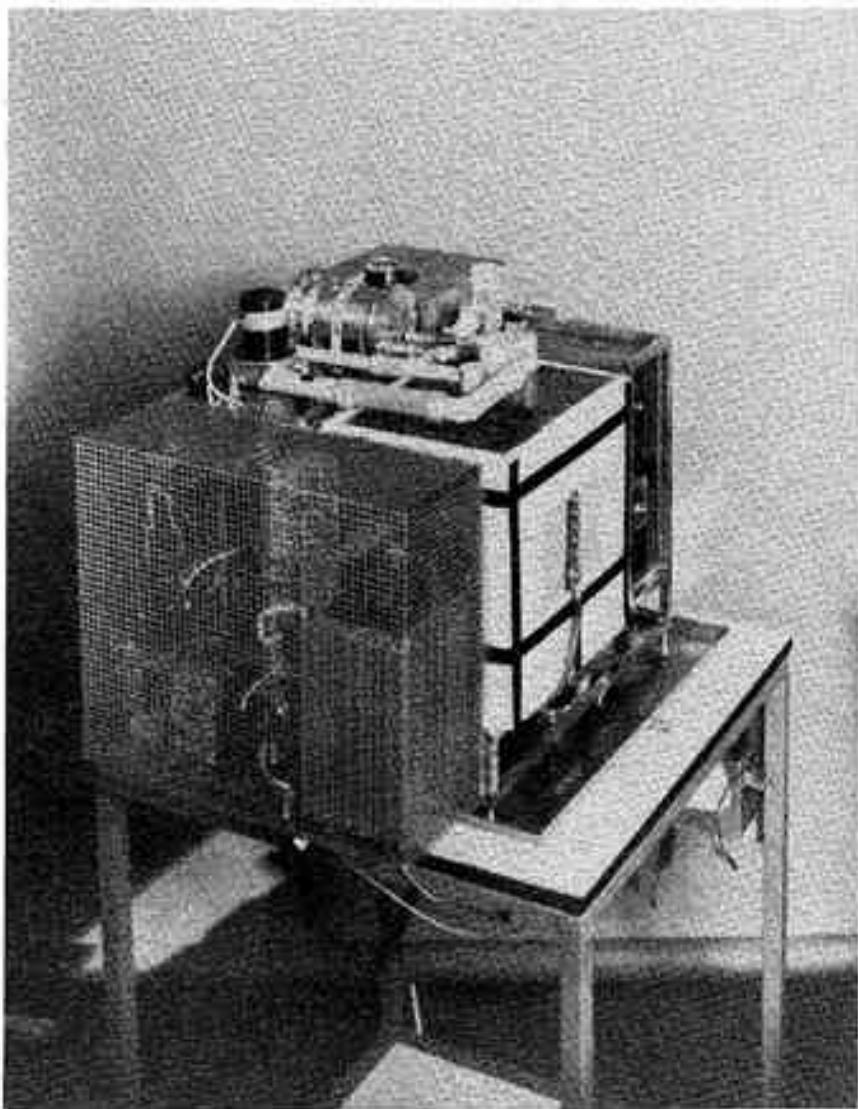
Systèmes et procédures Principaux Po	Thèmes de recherche
	Connaissances des processus fondamentaux en corrosion électrochimique <ul style="list-style-type: none"> • Influence des états structurels du solide • Evolution de H_2: Dissolution anodique • Etude de l'inhibition, de la passivation
	Etude des phénomènes de polarisation <ul style="list-style-type: none"> • Comportement des anodes - Electrocrystallisation • Comportement des électrodes à H_2 - ELECTROCATALYSE • Recherche de nouveaux matériaux • Nouveaux électrolytes • Nouvelles électrodes • Nouveaux séparateurs
	Elucidation des mécanismes réactionnels <ul style="list-style-type: none"> - Rôle du solvant - Rôle de l'électrode - ELECTROCATALYSE
	<ul style="list-style-type: none"> • Optimisation des processus de transport des espèces • ELECTROCATALYSE: \leftarrow Electrode à O_2 \rightarrow Electrode à H_2
	<ul style="list-style-type: none"> • Sélection des catalystes • Etude des possibilités de stockage dans les hydrures
	<ul style="list-style-type: none"> • Sélection de nouveaux systèmes • Recherche de nouveaux matériaux d'électrode • Recherche de nouveaux matériaux comme électrolyte
	Elucidation des mécanismes réactionnels. Etude des polarisations

Fig. 2



Pile à combustible hydrogène-air, d'une puissance maximale de 1,3 kw

lors de discontinuités dans la production (hypothèse d'un générateur par photopiles) ; stockage en vue de l'alimentation en énergie électrique de divers véhicules. Ce problème est celui notamment de l'électrification des véhicules routiers. On notera que dans ce secteur, les économies en énergie peuvent être importantes puisque une automobile à moteur thermique, en zone urbaine, fonctionne avec un rendement global de l'ordre de seulement 10 %.

Ayant précisé quels étaient les secteurs d'intervention de l'électrochimie, on peut maintenant analyser quels sont les obstacles qui s'opposent au développement des différentes filières et procédés et par la suite déterminer les sujets de recherches correspondantes (fig. 2).

En ce qui concerne la corrosion qu'il s'agisse de la sélection de matériaux plus résistants ou de leur protection il conviendra d'étudier les relations existant entre la structure des matériaux et la cinétique des réactions superficielles : dissolution anodique, adsorptions, passivation.

En ce qui concerne l'amélioration des rendements énergétiques des procédés électrochimiques d'électrosynthèse, on devra soit abaisser la température de réaction soit diminuer les polarisations aux électrodes. Dans tous les cas, il conviendra de disposer de nouveaux matériaux pour faire des électrodes, électrolytes ou séparateurs.

Pour les nouveaux procédés d'électrosynthèse, en électrochimie organique il s'agira, avant tout d'élucider les mécanismes réactionnels en analysant le rôle du solvant et celui de l'électrode.

Pour les nouveaux procédés d'électrolyse en vue de la production de H_2 , le but sera d'obtenir de bons rendements, surtout dans les filières à basse température ; de diminuer les polarisations aux électrodes et nous préciserons plus loin que ces problèmes sont essentiellement relatifs à l'étude des processus électrocatalytiques.

Pour le stockage et la conversion de l'énergie, deux systèmes sont à considérer : piles à combustibles (PAC) et accumulateur.

En ce qui concerne les piles à combustibles, H₂-air, il s'agit d'améliorer leurs performances et notamment leurs caractéristiques massiques. Mais déjà depuis dix ans des progrès importants ont été acquis sur ce point et les obstacles à leur développement sont surtout dus au prix du Kwh, à la longévité et à la fiabilité de ces générateurs. Toutes ces caractéristiques sont liées à la nature des électrodes et plus précisément à leurs propriétés électrocatalytiques, les catalyseurs employés devant être très actifs mais non précieux.

De plus l'alimentation en H_2 justifie la recherche de moyens élégants de stockage de ce combustible, d'où des recherches par exemple sur le stockage sous forme d'hydrures.

En ce qui concerne les accumulateurs, lorsqu'il s'agit d'une utilisation pour équiper un véhicule électrique, afin que ce véhicule possède des performances acceptables il convient que l'énergie massique de l'accumulateur soit au moins égale à 100 Wh/kg. Or les accumulateurs dont nous disposons actuellement (au plomb par exemple) ont une énergie massique trois fois trop faible. De plus le coût de l'accumulateur et sa longévité, c'est-à-dire le nombre de cycles de charge et décharge admissible, sont des éléments importants. Dans ces conditions, il s'agit de la sélection et de la mise en œuvre de nouveaux couples et il convient de disposer de nouveaux électrolytes et de nouveaux matériaux pour les électrodes.

Le champ des applications de l'électrochimie apparaît donc très vaste et nous n'avons souligné ici que les principaux aspects. Les sujets de recherches apparaissent par conséquent fort variés mais une analyse plus poussée révèle un nombre limité de thèmes fondamentaux (fig. 3).

Les principaux objectifs, sur un plan technique, sont :

- la réduction des polarisations,
- l'abaissement des températures de fonctionnement,
- l'utilisation de nouveaux couples dans les générateurs,
- la réalisation de nouvelles électrosynthèses.

Pour cela, il est toujours nécessaire d'élucider les mécanismes réactionnels et de disposer de nouveaux matériaux comme électrolyte ou comme électrode. Ces recherches reposent fondamentalement sur l'analyse de la polarisation électrochimique. Il apparaît donc utile de rappeler brièvement à l'aide de données concernant des systèmes effectivement opérationnels, le rapport existant entre polarisation et déperdition énergétique (fig. 4).

Ce schéma comporte deux cadans. Dans le cadran supérieur, ont été tracées les caractéristiques d'une pile H_2 -air actuellement en service à l'institut français du pétrole ; dans le cadran inférieur : caractéristiques d'un électrolyseur construit par la firme Brown-Boveri. Notons que ces deux systèmes ont été choisis parmi ceux qui ont actuellement les meilleures caractéristiques du point de vue rendement énergétique. Pour une densité de courant de 100 mA/cm^2 , on constate que la tension aux bornes de la pile n'est plus de 1,23 V (conditions de réversibilité parfaites) mais de 0,7 V. Le rendement énergétique

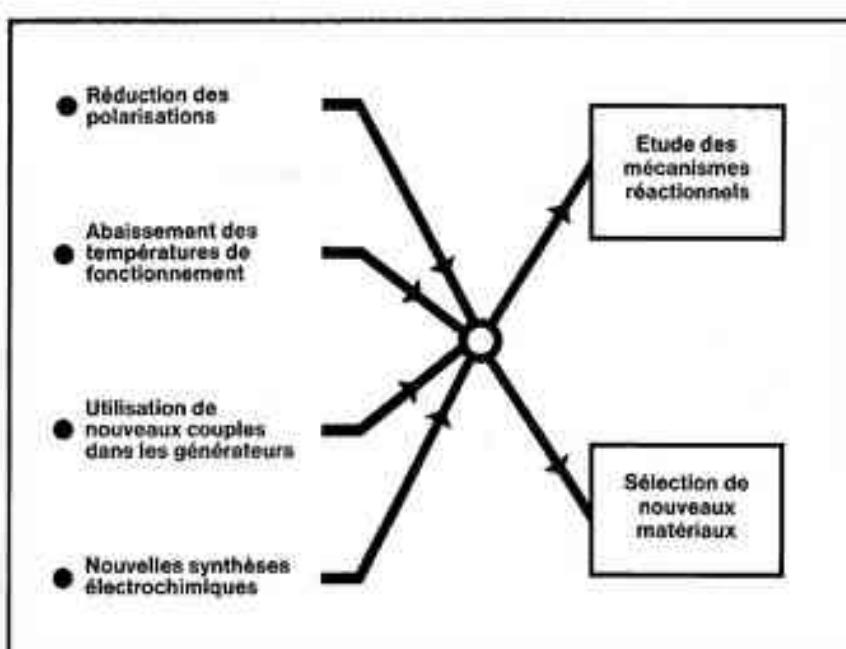


Fig. 3

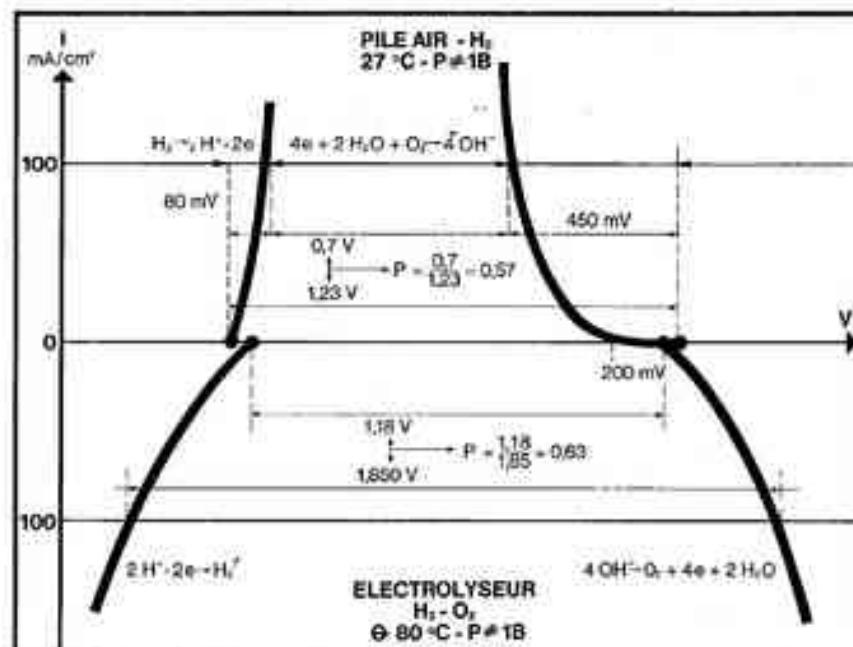


Fig. 4

n'est donc que de $0,7/1,23 = 0,57$, une fraction de l'énergie n'est pas disponible sous une forme électrique mais est dissipée en chaleur de polarisation. Une situation analogue est révélée par l'examen des caractéristiques de l'électrolyseur. En définitive, on constate que la polarisation est d'autant plus grande que la courbure des fonctions $I = f(V)$ de chaque électrode est plus prononcée.

Il s'agit donc essentiellement de rechercher les conditions propres à rendre les électrodes moins polarisées. Quelles sont les causes des polarisations aux électrodes (fig. 5) ?

On peut distinguer deux sortes de phénomènes à l'origine des polarisations aux électrodes.

- Un ensemble de processus qui se déroulent au sein de chacune des phases : phénomènes responsables de la conduction (électronique ou ionique) ; réactions chimiques en milieu homogène ; phénomènes de transport des espèces réagissantes (processus de diffusion par exemple).

- D'autre part, des phénomènes qui se déroulent à l'interface électrode/électrolyte, donc des phénomènes très localisés : transferts de charges (échange d'électrons) et réactions d'adsorption.

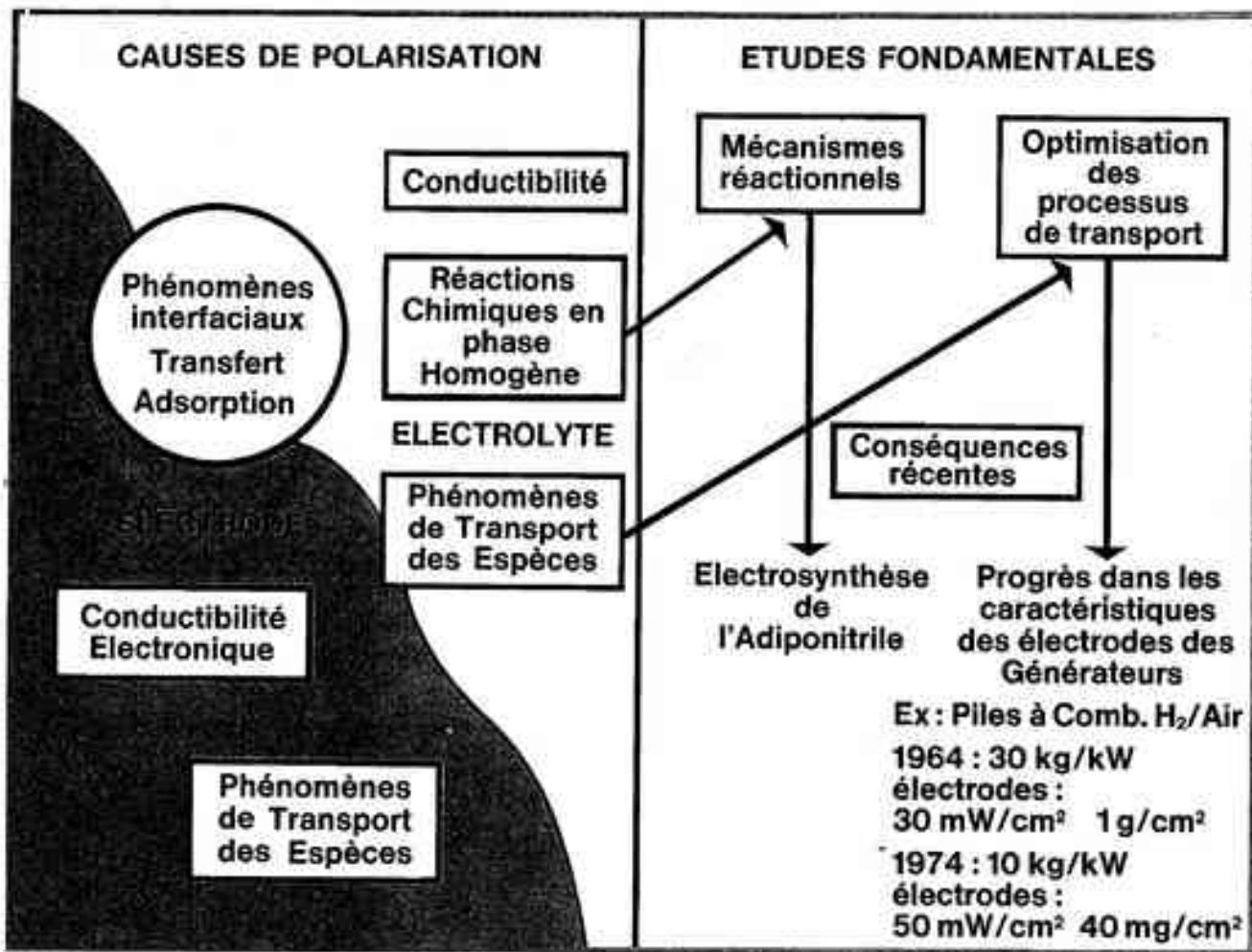


Fig. 5

La cinétique électrochimique, discipline relativement jeune puisque développée depuis moins de 20 ans a pour objectif l'étude de tous ces phénomènes. Des résultats intéressants ont déjà été acquis

en ce qui concerne la compréhension des mécanismes réactionnels et de ce fait dès 1963, on a pu réaliser la préparation industrielle de l'adiponitrile, base importante dans la synthèse du « nylon ».

Par ailleurs, on sait décrire correctement les phénomènes de transport des espèces et c'est ainsi que le déroulement de ces processus dans les électrodes poreuses pour générateurs a pu être optimisé.

Ainsi à titre d'exemple on peut constater que l'amélioration des caractéristiques massiques des piles à combustibles est due à l'optimisation des phénomènes de transport aux électrodes. En 1964, une pile air-H₂ pesait 30 kg pour 1 Kw. En 1974, elle pèse seulement 10 kg/kw.

Cette amélioration spectaculaire des caractéristiques massiques est essentiellement due au fait que pour des puissances surfaciques plus élevées, les électrodes ont été très allégées (40 mg/cm² au lieu de 1 g/cm²), le fonctionnement de ces électrodes ayant été bien compris.

En revanche, nos connaissances sont bien plus réduites en ce qui concerne la compréhension des phénomènes interfaciaux. Or, nous avons vu parmi les sujets de recherche énumérés précédemment apparaître à plusieurs occasions l'électrocatalyse. Les processus électrocatalytiques appartiennent à la classe des phénomènes interfaciaux. Il s'agit essentiellement des réactions d'oxydo-réduction dont la vitesse dé-

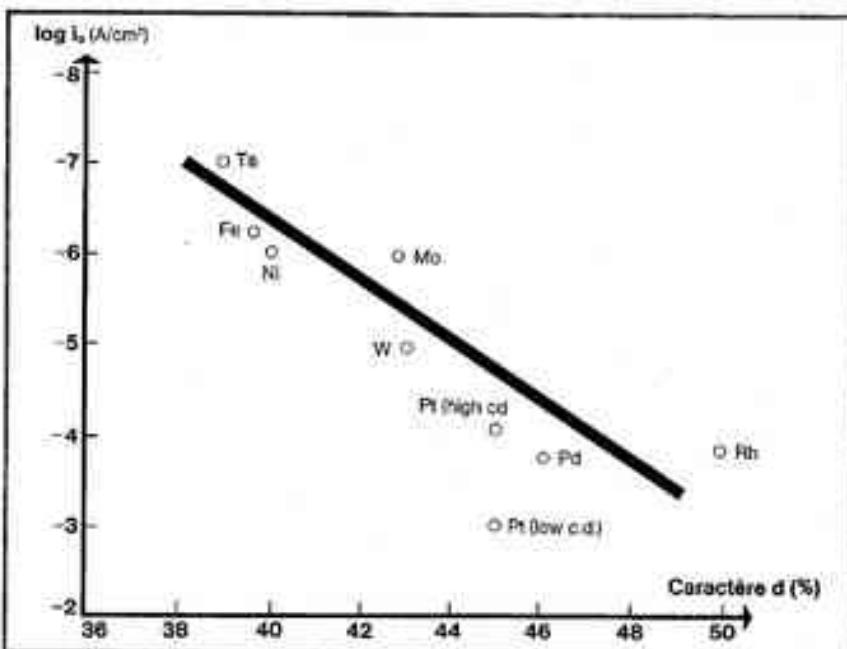


Fig. 6

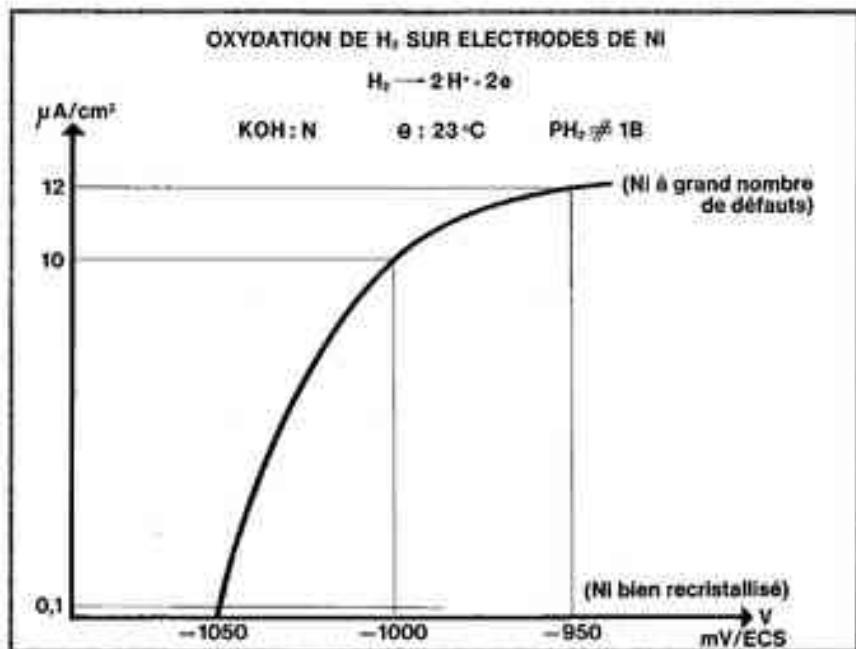


Fig. 7

pend considérablement de la nature des électrodes sur lesquelles elles se produisent.

L'exemple le plus typique est celui de la réaction d'oxydo-réduction de l'hydrogène, réaction que l'on rencontrera dans de nombreux systèmes électrochimiques (fig. 6).

Sur le diagramme il a été porté, pour plusieurs métaux constituant des électrodes, le logarithme de la vitesse de la réaction exprimé ici par le logarithme du courant d'échange. On constate que pour des métaux comme le fer ou tantale, la vitesse d'oxydo-réduction de l'hydrogène est environ dix mille fois plus faible que pour des métaux comme le platine.

Or plus la vitesse de réaction est faible plus la polarisation est grande. Il s'agira donc d'utiliser pour en constituer des électrodes, des matériaux comme le platine. On constate malheureusement que les constituants les plus actifs sont les métaux les plus précieux.

L'objectif essentiel en électrocatalyse sera donc la sélection de matériaux ayant si possible une activité aussi grande ou supérieure à celle de métaux tels que le platine. Il est évident que cette recherche ne peut s'effectuer que dans la mesure où l'on possède une théorie suffisamment élaborée pour qu'elle permette une prévision. Actuellement cette théorie est encore loin d'être établie et l'on procéde à l'acquisition de corrélations significatives et à l'accumulation de données expérimentales pour la construire.

Toutefois, cette recherche donne déjà lieu à des résultats encourageants. On a pu montrer qu'en agissant sur la structure cristalline d'un métal non noble comme le nickel et qui a généralement une activité électrocatalytique médiocre à la température ambiante comparée à celle des métaux précieux, on pouvait leur conférer des propriétés très acceptables (fig. 7).

Sur cette figure ont été portées les courbes de polarisation $I = f(V)$ de deux électrodes de nickel de même surface réactionnelle où s'effectue à leur surface la réaction d'oxydation de H_2 .

On constate suivant l'état de cristallinité du solide une variation considérable (facteur 100) dans l'activité électrocatalytique.

En définitive, on peut tirer, de cette analyse très sommaire des recherches à entreprendre en électrocatalyse, une conclusion. Cette conclusion aurait été du même ordre si nous nous étions intéressés non pas à l'électrocatalyse mais aux problèmes posés par la sélection de nouveaux électrolytes.

Nous constatons en effet que toute innovation en électrochimie est tributaire de la sélection de nouveaux matériaux pour en constituer des électrodes (catalytiques ou non) ou des électrolytes. Or cette sélection ne peut s'effectuer que par l'acquisition de bases théoriques qui permettent une prévision quant à la nature et la structure des matériaux ayant les propriétés optimales.

L'acquisition de ces bases fondamentales peut demander du temps, mais il conviendrait de pas être tenté par le recours à une sélection empirique, consistant à passer en revue un grand nombre de composés en espérant par hasard découvrir le plus intéressant. De telles tentatives se sont déjà soldées naguère, par un échec, en pure perte de temps et de moyens. Il faut donc poursuivre et intensifier nos efforts en abordant les problèmes dans leurs aspects les plus fondamentaux. Les motivations en énergétique justifient amplement cet effort. En outre, notons que les filières électrochimiques offrent souvent des solutions intéressantes en ce qui concerne la sauvegarde de l'environnement.

Guy BRONOEL
Maître de recherche
laboratoire d'électrolyse
et service d'électrophorèse.

La photo énergétique

L'énergie solaire est la seule source d'énergie inépuisable et non polluante, et bien que son impact dans la vie économique ne sera pas dans l'immédiat significatif, elle risque après l'an 2000 d'entrer en compétition avec d'autres types d'énergie devenus classiques à cette échéance.

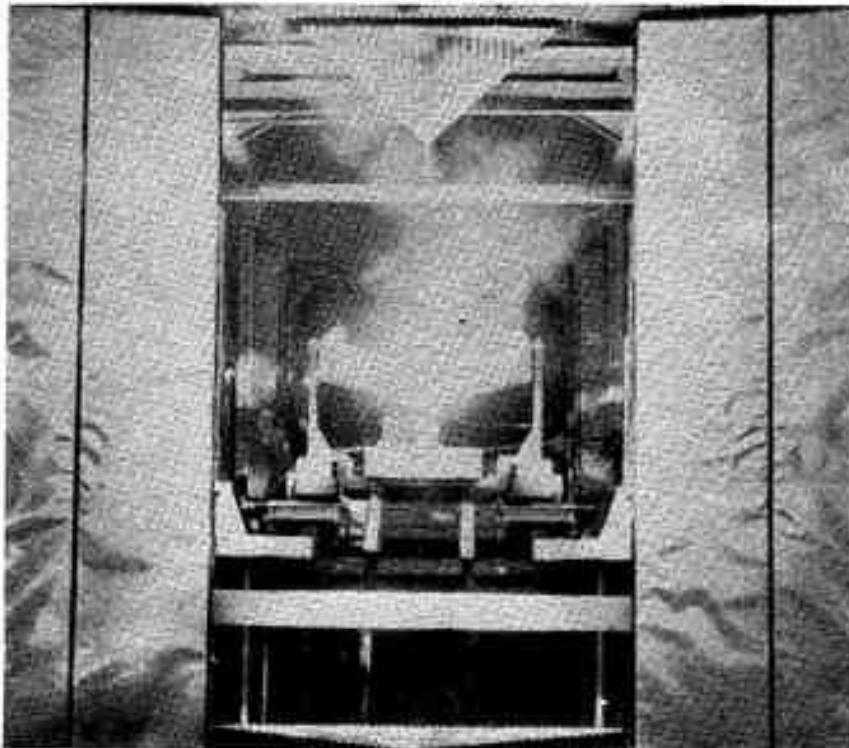
Toutefois et suivant que l'on considère les trois modes de valorisation de cette énergie, on constate un heureux échelonnement dans le temps des applications possibles suivant que l'on considère :

- à court terme, le stockage de cette énergie dans l'habitat solaire
- à moyen terme, la concentration optique vers des centrales héliothermiques
- à long terme, la conversion de cette énergie en kWh

Nous arrivons en cette fin de journée au dernier volet du panorama des actions de recherches susceptibles d'être menées pour économiser de l'énergie ou exploiter de nouvelles sources en nous parlant des problèmes que posent l'utilisation directe de l'énergie solaire par l'homme. Le soleil est cette source de lumière et de chaleur qui paraît inépuisable (les rapports pessimistes donnent au soleil une vie supérieure à 100 milliards d'années). Voilà donc une énergie gratuite qui, jour après jour, nous apporte la vie et qui ne pollue pas.

En fait, aussitôt que l'on essaye de voir pratiquement comment domestiquer cette énergie on s'aperçoit que ce n'est pas simple et que nous sommes encore loin d'avoir la maîtrise que possède la nature.

Tout d'abord, l'énergie solaire reçue au sol est de faible densité 1 KW/m^2 . Il faut donc couvrir de larges espaces pour recueillir une quantité appréciable d'énergie. Une surface de 100 km^2 ne produirait que 1 % de notre consommation actuelle d'énergie en France. De plus, l'intensité de l'énergie solaire varie tout au long du jour. Le rayonnement est intermittent, saisonnier. Il se pose donc immédiatement un problème de stockage.



Le foyer du four solaire : fusion de bauxite (bac en V)

En outre, tous les pays ne bénéficient pas d'un ensoleillement important. La France, en particulier, occupe une position moyenne. En fin de compte, l'utilisation de l'énergie solaire pose de grands problèmes. Des efforts considérables sont à faire, non seulement sur le plan technologique, mais aussi sur le plan fondamental. Et c'est pour cette raison qu'il est utile que les chercheurs soient sensibilisés à ces problèmes.

Nous pouvons distinguer deux types d'utilisation :

- l'une quantique : c'est la totalité de l'énergie de chaque photon qui est absorbé, autant que possible stocké et qui est susceptible d'être restitué en énergie électrique ou thermique etc.
- l'autre non quantique : le soleil est utilisé comme une source de chaleur

pour chauffer un matériau, un liquide, avec cependant, cette difficulté que l'étendue de la source est très petite et que pour recueillir une quantité importante d'énergie il faut des récepteurs de grande taille, de plus la source se déplaçant constamment il faut quelquefois la suivre dans le ciel. Mais ces problèmes étant résolus, on est ramené à la mise en place de machine thermique que l'on connaît bien depuis les travaux de Carnot.

Je passerai tout d'abord en revue, très rapidement, quelques dispositifs d'utilisation non quantique de l'énergie solaire car il s'agit là en grande partie de problèmes qui relèvent plus de développements de recherche fondamentale, encore que des recherches de soutien soient indispensables.

Un des systèmes qui est disponible sur le marché est la pompe thermique mise au point en France et commercialisée par la Société Sofretes. On trouve des unités de 1kw et des projets de plus grande puissance (25 kw) sont en cours de réalisation.

Des panneaux-plans (pas de concentration) captent l'énergie infrarouge du soleil qui chauffe un fluide source chaude (mais de température peu élevée : 80°) d'une machine thermique qui fonctionne suivant un cycle de Rankine. Une machine de 25 kw nécessite un récepteur de 1 300 m² de surface. Le coût du kilowatt-heure installé est encore onéreux mais pour des usages particuliers dans des zones très ensoleillées où le transport de l'énergie est mal aisés, ce type de générateur d'électricité est d'ores et déjà en service.

Pour des installations plus importantes on est amené naturellement à envisager de larges récepteurs et à concentrer le rayonnement pour porter le fluide de la machine à des températures plus élevées de manière à améliorer le rendement thermique de la machine. Ces systèmes travailleront entre 300 et 600°C, donc avec un rendement thermodynamique voisin de celui des centrales thermiques classiques. Différentes configurations peuvent être utilisées notamment en ce qui concerne la concentration du rayonnement : champs de miroirs cylindro-paraboliques ; champs de miroirs plans ; et champs de miroirs paraboliques renvoyant le soleil sur un tour « chaudière ».

La chaudière solaire impose un système d'orientation destiné à former l'image du soleil sur le capteur-chaudière. Elle n'est donc utilisable que par ciel clair, ou à l'extrême limite, avec de rares passages de nuages isolés. Ceci impose donc, contrairement à l'utilisation précédente, un choix beaucoup plus restrictif des sites. En contrepartie, le fait de travailler à des températures plus élevées, donc avec un meilleur rendement, devrait permettre, en des lieux donnés, une production plus économique.

Dans le domaine du chauffage par le rayonnement du soleil en utilisant ce type de dispositif il est notable que la France bénéficie d'une expérience inégalée dans le monde. Je pense, bien entendu, aux installations du C.N.R.S. à Odeillo qu'il faut adapter à ces recherches. Des projets sont en cours au C.N.R.S. pour exploiter cet atout majeur que nous possédons.

Une utilisation dont on parle beaucoup concerne l'habitat solaire. On entend par là l'utilisation directe du rayonnement solaire sur le lieu d'habitation (chauffage, climatisation).

Puisque le rayonnement solaire est réparti sur de larges surfaces, il est tentant de l'utiliser point par point, ce qui évite la concentration et les pertes au

cours de la distribution de l'énergie convertie. De très nombreux prototypes d'habitats solaires sont actuellement en cours d'expérimentation, les premiers sont d'ailleurs nés en France. Les butées qui arrêtent l'exploitation de données acquises aujourd'hui et pour lesquelles l'intervention du C.N.R.S. est envisagée sont en particulier :

- une meilleure connaissance du gisement solaire,
- des études de capteurs solaires adaptées à l'habitat,
- le stockage de l'énergie solaire pour palier les inconvénients dus à l'intermittence de l'ensoleillement.

Les retombées des recherches dans le domaine de l'habitat solaire peuvent avoir un impact dans un avenir proche dans notre pays et même dans des régions qui ne sont pas réputées pour leur ensoleillement. En fait, il s'agit là d'un problème pluridisciplinaire faisant intervenir des laboratoires de recherche du C.N.R.S., du centre national d'études spatiales, de l'institut national de recherche agronomique, de l'université, des centres professionnels, des services publics (E.D.F. etc.). Venons-en maintenant à l'utilisation quantique de l'énergie solaire. C'est certainement une utilisation très noble, car tout se passe comme si la source chaude était à 6 000°C et la source froide à la température ambiante d'où un rendement remarquable. Un autre avantage est le fait qu'on utilise le rayonnement diffus aussi bien que direct.

La photopile

Le système le plus au point est, sans aucun doute, la photopile. Les photopies sont des dispositifs qui convertissent directement l'énergie solaire en énergie électrique. Ils sont connus depuis très longtemps. A leur stade de développement les photopies françaises concurrencent bien les batteries ou Diesel pour des applications limitées (station au sol fixe ou isolée, balise en mer, télévision scolaire en Afrique). A 10 F le watt, elles s'imposeraient dans de nombreux cas (fourniture d'électricité à l'habitat en Afrique).

Aujourd'hui, le principal obstacle à vaincre pour assurer le développement de photopies est leur coût trop élevé.

La photosynthèse

L'utilisation de l'énergie solaire est bien au point dans la nature. En effet, l'appareil photosynthétique est certainement le système sur terre le plus perfectionné pour utiliser cette énergie mais à un rythme qui n'est peut-être pas le nôtre. Tout se passe comme si les photons étaient la matière première. Ces photons sont absorbés dans les chloroplastes et à la suite d'un processus très compliqué, non encore élucidé, des molécules d'eau

sont photolysées, de l'oxygène est rejeté et l'hydrogène (en fait les électrons) est utilisé pour produire une substance riche en énergie capable de réduire le CO₂. C'est un tour de force tout à fait remarquable.

Les molécules de chlorophylle travaillent en groupe de trois cents molécules de chlorophylle qui agissent comme une unité. Il faut environ huit photons pour réduire une molécule de CO₂ et produire une molécule d'O₂.

Comme pour les piles, on peut parler de rendement énergétique de la photosynthèse. Il est élevé au niveau cellulaire, environ 30 %, mais évalué sur une unité, ce rendement, dans de bonnes conditions, est inférieur à 1 %. A court terme, les perspectives de l'utilisation de l'énergie solaire par la photosynthèse sont principalement du ressort de l'agronomie, de techniques industrielles appliquées par exemple à la fermentation, etc. On envisage également la production d'hydrogène à partir de l'eau en utilisant l'appareil photosynthétique des végétaux associé à l'hydrogénase bactérienne. A long terme, il s'agit d'approfondir notre compréhension du fonctionnement de l'appareil photosynthétique en vue de créer de nouvelles structures artificielles supérieures à celles déjà explorées actuellement (telles que les photopies, les piles photovoltaïques, etc.).

La photochimie

Enfin, il faut considérer ce que peut apporter la photochimie. Certaines réactions photochimiques peuvent être exploitées pour des synthèses industrielles, et certaines piles photovoltaïques sont capables de fournir une force électromotrice. A plus long terme la dissociation photosensibilisée de l'eau apparaît réalisable. Ces perspectives justifient de recommander un développement des recherches sur les mécanismes à plusieurs photons utilisant des centres réactifs convenables.

En conclusion, on peut dire que nous sommes encore au tout début de l'ère de l'utilisation de l'énergie solaire directement par l'homme. Il reste encore beaucoup à faire non seulement sur le plan technologique mais aussi sur le plan fondamental de la recherche. De nouvelles structures sont à trouver, de nouveaux procédés sont à mettre en œuvre. On ne pourra avancer que si un haut niveau scientifique est maintenu. Nous avons beaucoup à apprendre de la nature et sans copier ce qui serait pratiquement impossible, il nous faut transposer, innover. C'est une tâche exaltante pour les chercheurs si on sait les intéresser à cette grande aventure.

Jean JOUSSOT-DUBIEN
Professeur à l'université de Bordeaux,
Responsable de l'ERA 167

Economie et énergie

Les considérations économiques définissent moins un secteur particulier des recherches sur l'énergie qu'une dimension originale du problème, à prendre en compte dans l'ensemble des recherches. Toute innovation technologique se justifie en définitive par les avantages qu'elle procure, rapportés aux coûts qu'elle entraîne. C'est pourquoi, parmi les recommandations exprimées par les participants, on en trouvera un certain nombre qui consistent à souligner le caractère particulièrement avantageux et «économique» de tel ou tel type de recherche relevant de la compétence d'un autre groupe de travail et en ce sens, le groupe «études économiques et énergie» peut être amené à jouer le rôle de conseil vis à vis des autres groupes.

Par ailleurs, les études économiques proprement dites ont été envisagées dans leur lien avec des disciplines dont la contribution est indispensable, telles que l'informatique, l'automatique, l'analyse des systèmes.

Enfin, l'approche économique n'a pas été coupée de l'analyse des comportements, des modes de vie, des formes d'organisation sociale, et des stratégies des principaux acteurs.

Trois objectifs seront successivement poursuivis dans les pages qui suivent :

- 1^{re} partie : situer de façon générale la dimension économique des problèmes de l'énergie.
- 2^{me} partie : présenter les lignes de recherche dont le développement est apparu prioritaire, y compris les études susceptibles d'applications à court et moyen terme.
- 3^{me} partie : définir les actions qui pourraient être plus particulièrement entreprises par le C.N.R.S.

Les études économiques et le problème de l'énergie

Menaces de pénurie physique d'énergie primaire, stratégie des détenteurs de ressources pétrolières, gaspillage ? Quelles que soient les appréciations portées sur ces différents aspects du problème actuel de l'énergie, les conséquences sont claires : la hausse importante et durable du prix de l'énergie rend beaucoup plus vitaux que par le passé des objectifs tels que : recherche de nouvelles énergies primaires ; meilleure articulation des qualités d'énergie ; utilisation plus efficiente de l'énergie sous toute ses formes et révision dans tous les domaines, des arbitrages favorisant la consommation d'une énergie disponible à bas prix, au détriment des dépenses en capital jugées plus onéreuses.

L'apport majeur des études économiques à la solution de ces problèmes est de permettre, par des calculs d'optimisation, la recherche de la satisfaction maximale au moindre coût énergétique, compte tenu des contraintes physiques, technologiques et aussi sociales.

Tout calcul d'optimisation suppose une connaissance claire de ce que l'on cherche à minimiser ou maximiser, et, dans le cas de l'énergie, les objectifs à prendre en compte sont multiples ; en outre, le problème ne se présente pas de la même façon suivant la taille de l'ensemble ou du système que l'on cherche à optimiser :
- Les objectifs désirables sont multiples, on retiendra en particulier :
• minimiser le coût de l'énergie pour la société, c'est-à-dire sur le plan quantitatif, chercher à réduire la consommation globale d'énergie pour un niveau de satisfaction donné ; sur le plan qualitatif, privilégier la production de la calorie ou du kWh au moindre coût

- assurer une sécurité suffisante de l'approvisionnement, notamment par le respect d'une certaine diversité des types d'énergie primaire utilisées.

- améliorer la structure de la balance commerciale, ce qui conduit en particulier à développer dans la mesure du possible la production d'énergie à partir de sources d'énergie primaire disponibles sur le territoire national et privilégier, à défaut, les achats à l'extérieur qui minimisent le rapport entre coût de la matière première et prix de revient du kWh. On peut comparer de ce point de vue pétrole, gaz naturel, uranium, etc...
- protéger ou améliorer la qualité de l'environnement.

Tous ces objectifs ne sont pas totalement convergents, tant s'en faut : «réduire le coût de production du kWh» n'est pas synonyme de «réduire le déficit de la balance commerciale» ; de même, le souci d'économiser l'énergie peut tantôt contribuer à diminuer certaines pollutions, tantôt au contraire compromettre la qualité de l'environnement.

Des choix et des hiérarchies s'imposent : le problème n'est pas d'ordre technologique, ni d'ordre économique. Ses données varient en outre selon les situations nationales. Le cas français, qui sera pris plus particulièrement en considération dans ce rapport, se caractérise, par le très faible apport des ressources nationales en énergie primaire : les problèmes de sécurité d'approvisionnement et d'équilibre du commerce extérieur s'y poseront donc avec plus d'acuité et pèseront plus dans les décisions que dans d'autres pays mieux lotis.

C'est dire que les orientations prises par la recherche en matière d'énergie dans d'autres pays, les Etats-Unis par exemple, ne correspondent pas forcément aux préoccupations qui apparaissent prioritaires dans le cadre national.

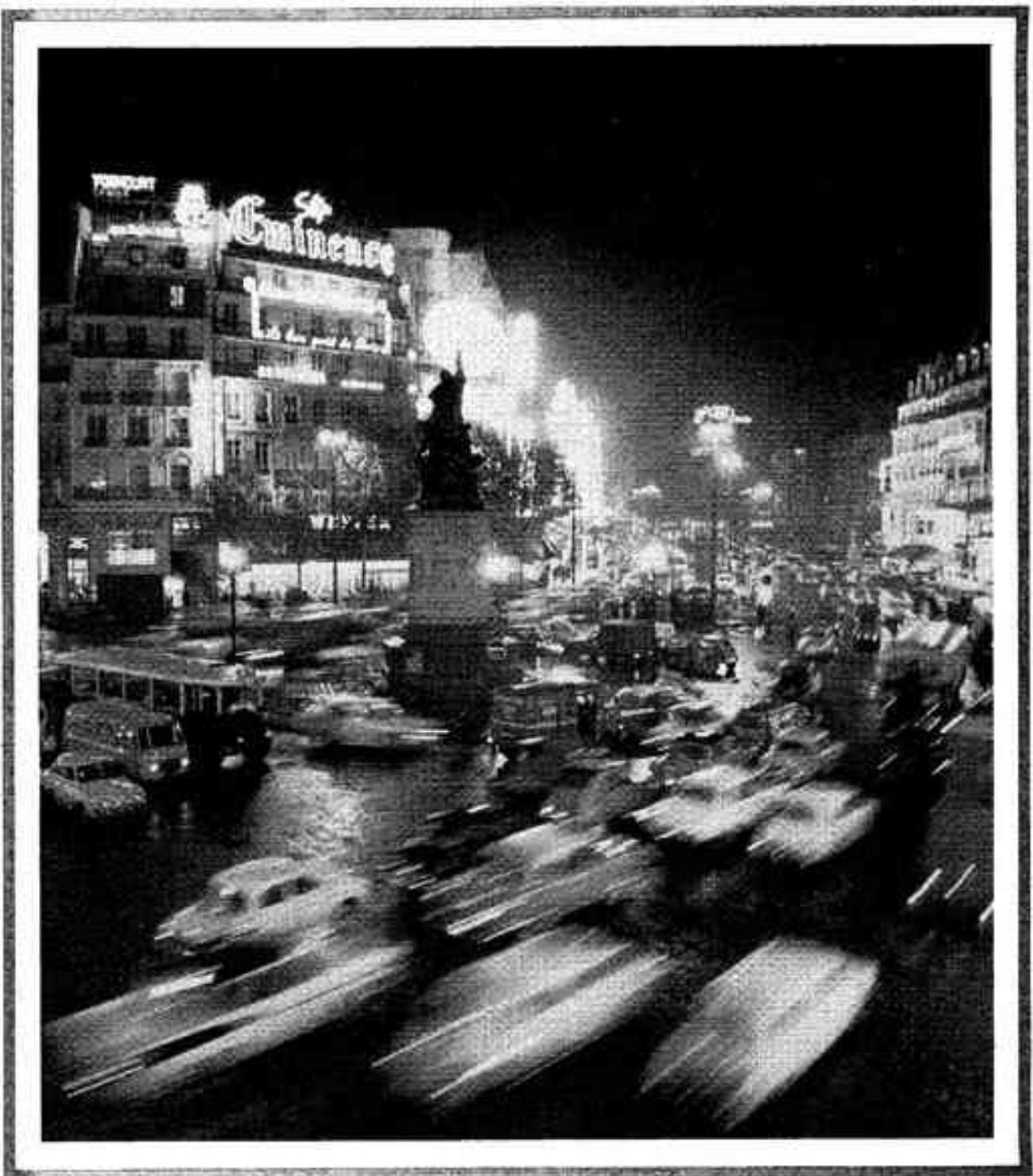


Photo: F. Alnay / O.M.S.

La taille de l'ensemble à optimiser n'est évidemment pas sans importance pour le type de recherches à entreprendre et pour les solutions à proposer.

Par exemple, c'est bien dans un souci d'optimisation que l'on peut chercher à fabriquer des carburants ayant un indice d'octane de plus en plus élevé, et à augmenter le taux de compression des mo-

teurs. Mais de telles recherches prennent comme fin en soi l'amélioration d'un mode de propulsion donné des véhicules automobiles.

Par définition, elles laissent de côté le problème de la comparaison avec d'autres solutions technologiques, telles que le moteur diesel ou le véhicule électrique. A un niveau plus global se posera la question du choix entre

transport individuel et transport collectif. A son tour, le système des transports pris dans son ensemble n'est pas clos sur lui-même : pour autant que certains déplacements physiques ont pour fonction essentielle la transmission d'un message, il convient d'examiner, du point de vue du rapport coût, efficacité, les possibilités de substitution (courrier, télécommunication).

Des remarques similaires pourraient être faites à propos des calculs d'optimisation des producteurs d'énergie. Il faut donc tenir compte à la fois de la séparabilité de chaque problème et de son lien à une perspective d'ensemble qui met en jeu, en définitive, la totalité du système social. A ce dernier niveau, les problèmes changent de nature en même temps que de taille.

Optimiser la production et la consommation d'énergie n'est donc pas un objectif simple. En outre, tous les calculs auxquels on peut se livrer requièrent une évaluation correcte de l'énergie consommée, et des hypothèses satisfaisantes en matière de prix : autant de thèmes de recherche également importants pour les sciences économiques.

Les principaux thèmes de recherches

Evaluer les économies possibles d'énergie pourrait apparaître comme la contribution essentielle des études économiques, un paragraphe est consacré à ce thème qui appelle évidemment une liaison étroite avec les recherches scientifiques et technologiques.

Il est toutefois de nombreux problèmes qui touchent aux préalables mêmes des calculs d'optimisation : mesure de la consommation d'énergie, analyse des prix dans leur rapport avec l'évolution des ressources et des besoins, de la production et de la consommation. Ces différents points exigent des recherches dont certaines, tout en présentant un caractère fondamental, n'en sont pas moins directement et immédiatement utiles.

Une place à part sera faite au problème de l'environnement compte-tenu de ses liens complexes avec la recherche d'économies d'énergie.

Evaluation de la consommation d'énergie

A un premier niveau se pose un problème tout à fait fondamental et méthodologique : comment mesurer la consommation d'énergie ?

La période actuelle se caractérise par une substitution rapide entre différentes formes d'énergie ; les changements de prix intervenus récemment ne pourront qu'accélérer le rythme de cette substitution. Dans une telle situation, consommation apparente, consommation effective et consommation utile tendent à diverger, ce qui rend de moins en moins appropriées les évaluations en thermies ou en tonnes d'équivalent charbon. Il convient donc de corriger l'inadaptation des instruments de mesure actuellement employés, en s'interrogeant sur le concept même de consommation d'énergie, et en affinant le système d'équivalence

entre formes d'énergie. Il est urgent de développer les recherches déjà amorcées sur ces questions.

Les possibilités de substitutions existent non seulement pour les formes d'énergie, mais aussi pour les biens consommés. Pour satisfaire un besoin déterminé, tel matériau ou tel produit final peut être remplacé par tel autre moins coûteux en énergie. Une utilisation plus efficiente de l'énergie supposerait donc que l'on connaisse avec précision, pour chaque matériau, le rapport entre son coût énergétique, qui comprend l'ensemble des dépenses d'énergie nécessaires à sa fabrication et à son transport et son bénéfice énergétique, entendu au sens le plus large de manière à prendre en compte toutes les économies d'énergie induites par ses utilisations et aussi par ses possibilités de récupération et de recyclage. Ainsi pourrait être construit un bilan énergétique national, par formes d'énergies et par types de matériaux.

L'analyse des coûts énergétiques peut aussi être conduite à un niveau plus global, en étudiant non plus des matériaux ou des produits, mais des types d'activités, des modes de vie. Le système social dans son ensemble peut être considéré comme une « structure dissipative » dont le maintien en équilibre suppose l'injection permanente de flux énergétiques d'importance variable selon les types d'organisation et les styles de vie.

Si l'on tient à poser de façon radicale le problème de l'optimisation des consommations d'énergie, on ne peut éviter de s'interroger sur les relations entre énergie et société. Les « besoins » que l'industrie cherche à satisfaire ne doivent pas être identifiés trop hâtivement avec les demandes de produits matériels qui les expriment à un moment donné et dans une situation donnée : des substitutions sont possibles. Mais surtout, ces besoins eux-mêmes ne sauraient être considérés comme des a priori intangibles : leur définition est socio-culturelle au moins autant que physiologique. On peut alors se demander dans quelle mesure le souci d'économiser l'énergie, qui certes ne constitue pas une fin en soi, peut conduire malgré tout à remettre en question certaines habitudes de consommation. Quelle que soit la réponse donnée à cette question, il importe au moins de mieux évaluer les coûts énergétiques de nos activités et de nos styles de vie, afin notamment d'identifier ceux qui apparaissent particulièrement dispendieux, dans des domaines aussi variés que les transports, les loisirs, la consommation alimentaire, etc.

D'une manière plus générale, les statistiques disponibles devraient permettre aux chercheurs de mieux appréhender les rapports entre l'évolution des consommations d'énergie utile et divers indicateurs de structures économiques et sociales.

Production, consommation et prix

Sous ce titre sont regroupés quelques thèmes de recherches jugés prioritaires, sans prétention à l'exhaustivité.

La prospection, l'exploitation et la gestion des ressources naturelles soulèvent essentiellement des problèmes technologiques, abordés par d'autres groupes de travail. On soulignera cependant ici la grande utilité de l'informatique et de l'automatique dans le traitement de divers problèmes tels que la recherche des gisements, l'optimisation de leur exploitation, le contrôle des processus de production d'énergie secondaire, la gestion des équipements de production. Les automatisations s'accordent à estimer qu'un accroissement modeste de leurs recherches appliquées aux problèmes d'économie de l'énergie permettrait une réduction substantielle des dépenses énergétiques.

Dans le domaine des « énergies nouvelles », les membres du groupe ont notamment préconisé :

- le développement des recherches susceptibles de favoriser la pénétration de l'énergie nucléaire sur le marché de la chaleur : propulsion navale ; utilisation à moyen terme des hautes températures pour le vaporéage ou la réduction des minéraux de fer, et, à plus long terme, pour la thermolyse de l'eau ; mise au point à court terme d'un réacteur de technologie simple permettant d'alimenter certaines industries et les systèmes de chauffage urbain en calories à basse température ; production combinée de vapeur et d'électricité.
- la mise au point des procédés permettant l'utilisation directe de l'énergie solaire et de l'énergie géothermique et non pas seulement en vue de la production d'électricité.

On soulignera enfin la nécessité d'une évaluation plus précise des coûts et avantages comparés des diverses solutions envisageables pour le stockage et le transport de l'énergie. L'étude économique des possibilités offertes par l'hydrogène mérite tout particulièrement d'être approfondie.

La connaissance du système des producteurs d'énergie reste à ce jour très insuffisante, en partie par manque d'informations précises. Et pourtant, de la stratégie des grandes firmes énergétiques et de l'attitude des pouvoirs publics dépendent des décisions qui engagent l'avenir pour le long terme. Il apparaît donc indispensable de mieux connaître les grandes organisations concernées : structure, fonctionnement et interactions ; critères et processus des prises de décision ; modalités des changements de stratégie, et d'évaluer les conséquences en chaîne des grandes options (option pour le nu-

cléaire, option pour l'électricité). Par l'inertie qu'elles introduisent nécessairement au sein du système industriel, ces décisions contribuent à délimiter ce qui est effectivement réalisable dans l'univers des possibles inventoriés par la prospective technologique et sociale.

Choisir entre les innovations technologiques suppose également que l'on soit capable de raisonner sur des hypothèses de prix et des hypothèses de consommation suffisamment fiables à moyenne et à longue échéance : en matière de prix de l'énergie, l'économiste en est réduit aux conjectures. Le retour aux prix de 1970 semble exclu par les plus optimistes. Mais la marge est tout de même considérable entre une stagnation en francs constants, ou même une relative détente, et la perspective d'une hausse qui se poursuivrait pendant quelques années à un rythme plus rapide que le niveau moyen des prix. Aussi les analyses prévisionnelles ont-elles tendance à se donner plusieurs hypothèses.

Encore faut-il en justifier la vraisemblance. Une aide précieuse pourrait être apportée par le développement des recherches sur les stratégies des pays exportateurs de pétrole : jusqu'à quel niveau peuvent-ils envisager de faire monter les enchères sans trop encourager les substitutions, compte tenu des prix prévisibles des énergies concurrentes et des délais de la reconversion ? Quels sont leurs choix possibles entre la protection d'intérêts à long terme et l'accumulation immédiate de réserves en devises, dont le gonflement excessif n'est d'ailleurs pas sans dangers ? Quelles sont les implications politiques du problème ?

L'analyse des tendances de la consommation d'énergie donne également lieu à des scénarios très divers, tant pour le montant de la consommation globale que pour les rythmes de substitution. Outre les aléas de la prospective technologique et sociale, les chiffres avancés sont aussi fonction des hypothèses de prix retenues. Ainsi se retrouve, sous une autre forme, le problème des rapports entre énergie et société : quelle est pour les pays industrialisés et pour la France en particulier, l'élasticité de la demande d'énergie par rapport aux prix ? Dans quelle mesure un changement important et durable des prix de l'énergie serait-il susceptible d'affecter la demande des industriels et les habitudes des ménages (structure et niveau de leurs consommations, répartition de leurs activités) ?

D'une manière plus générale, il serait intéressant de mieux appréhender les effets prévisibles de toute inflexion qui pourrait survenir dans les courbes de consommation d'énergie. Si l'on ne peut envisager la poursuite indéfinie d'une

croissance exponentielle, quelles seront les incidences d'un ralentissement, par exemple sur la gestion des firmes.

Le problème du prix de l'énergie est en grande partie un problème d'économie publique et de politique économique, notamment dans un pays comme la France. L'analyse des systèmes de tarification, envisagés du point de vue de l'allocation optimale des ressources énergétiques, représente un domaine de recherche particulièrement important. Il englobe le problème du prix demandé à l'usager et celui des critères retenus pour la rémunération du fournisseur. Des suggestions ont été faites, par exemple, pour que l'on puisse tenir compte des décalages entre énergie livrée et effets produits.

Ce thème de recherche rejoint évidemment l'étude des stratégies des grandes firmes énergétiques et le problème de leur coordination en vue d'une optimisation au niveau national.

Si les points qui viennent d'être mentionnés peuvent faire l'objet d'études analytiques relativement autonomes, il importe cependant de tenir compte aussi de leurs multiples interactions. L'approche systématique, encore très peu développée, devrait alimenter de nouvelles recherches associant statisticiens, technologues, économistes, automaticiens, sociologues, historiens.

Les économies d'énergie

Les très nombreuses mesures envisageables pour favoriser une utilisation plus efficiente de l'énergie ne relèvent pas toutes, il s'en faut, de la recherche scientifique et de l'innovation technologique. Dans beaucoup de cas, on connaît parfaitement les procédés dont la mise en service ou la généralisation permettrait des économies substantielles d'énergie. Dans d'autres cas encore, la réduction de certaines dépenses est affaire de législation ou de règlement (modification des normes de chauffage collectif, par exemple). D'autres propositions font plus directement appel aux activités de recherche développement. On présentera ici, sans vouloir épouser le sujet, les thèmes de recherche qui ont été jugés particulièrement importants, en les regroupant selon les échéances visées.

Court terme : sans modification des installations existantes, une partie non négligeable de l'énergie consommée peut être économisée en améliorant les conditions de fonctionnement des machines, en réduisant les frottements, en renforçant les systèmes de contrôle et de régulation automatique, en consentant des dépenses relativement minimales pour augmenter l'isolation thermique. Ces suggestions concernent aussi bien les transports et le chauffage urbain que le secteur industriel proprement dit.

Moyen terme : modification des installations existantes en augmentant le nombre des récupérateurs : recyclage des rejets thermiques, recompression de la vapeur, amélioration de la technique des pompes à chaleur ; recherche de nouvelles méthodes de fractionnement permettant la régénération des déchets.

Long terme technologique : à ce niveau se situent les recherches visant soit à changer les procédés de fabrication et les matières premières utilisées pour obtenir un produit donné : exemple : remplacement de la bauxite par les schistes et argiles comme minerai d'aluminium ; recherche de matériaux de construction permettant une meilleure isolation thermique (éventuellement grâce à la récupération de certains déchets) et minimisant les coûts en énergie nécessaires à leur production ; emploi de certaines technologies à des fins multiples, soit à rechercher de nouvelles utilisations d'un matériau ou d'un produit donné (exemple : recherche de la meilleure utilisation des déchets).

Long terme scientifique, lui-même défini à plusieurs niveaux : on peut considérer comme point de départ le besoin matériel à satisfaire et remettre en cause les types de ressources matérielles et l'ensemble des processus de transformation auxquels on a recours pour y répondre. Outre le domaine de la production, le secteur des transports et celui du chauffage urbain appellent de nombreuses recherches susceptibles de favoriser de nouvelles technologies : nouveaux moyens de transports en commun à grande vitesse ; recherche d'une meilleure intégration des fonctions urbaines, impliquant par exemple la pénétration thermique à l'échelle de l'immeuble ou de l'agglomération, le développement de systèmes d'énergie totale, l'application de la recherche opérationnelle au problème global des transports urbains et, dans la mesure où les « besoins » eux-mêmes sont liés aux modes de vie, il n'est pas interdit de se demander à quoi pourrait ressembler une « société avancée à (relativement) bas profil énergétique ». Quelles conditions faudrait-il remplir et quels prix faudrait-il éventuellement payer pour se rapprocher de ce modèle ? Quels sont, dans notre société actuelle, les modes de vie et les types d'activité dont le coût énergétique peut être facilement réduit et ceux au contraire qui sont dispendieux en énergie dans leur principe même : automobiles, motonautisme, aliments élaborés et réfrigérés, et peut-être même loisirs. Par exemple, un style moderne d'alimentation a conduit à multiplier par vingt la dépense d'énergie extérieure pour la même valeur alimentaire et cela en quelques décennies.

Il est important de noter, en guise de conclusion, que la plupart des recherches susceptibles de conduire à des économies d'énergie impliquent sous une forme ou sous une autre des dépenses supplémentaires en capital : isolation, recyclage, récupération, mécanismes d'auto-régulation, nouveaux équipements urbains, etc... C'est donc à une révision des ratios entre dépenses de fonctionnement et dépenses d'équipement que nous oriente l'actuelle crise de l'énergie. Les économies réalisables dans le long terme peuvent être masquées par l'importance des investissements supplémentaires à consentir dans l'immédiat. Les calculs d'optimisation devront imposer l'habitude de raisonner en termes de bilans actualisés, tant au niveau du ménage qu'à celui de l'entreprise ou des pouvoirs publics.

Energie et environnement

Le souci de préserver la qualité de l'environnement ne constitue pas un problème à part : il est un élément du système des objectifs recherchés par la collectivité. Il illustre bien cependant, sur un point particulier, la complexité des problèmes soulevés par la volonté d'économiser l'énergie :

– dans certains cas privilégiés, la lutte contre le gaspillage énergétique et la valorisation de nouvelles techniques de production convergent avec la recherche d'un meilleur environnement : la récupération du carbone des déchets, le recyclage des rejets thermiques, l'utilisation de l'hydrogène ou de l'énergie solaire diminuent incontestablement la pollution – dans d'autres situations au contraire, les innovations technologiques ne sont pas sans danger pour la qualité de l'environnement ; la lutte contre ces nouvelles pollutions exige à son tour de nouveaux investissements et une consommation accrue d'énergie.

Dans la mesure où le souci d'économiser l'énergie et celui de protéger l'environnement peuvent entrer en compétition, il importe d'évaluer le mieux possible les coûts et avantages de chaque innovation au regard de ces deux objectifs. L'optimisation globale dépend en définitive d'options et de préférences qui gagnent à être éclairées par une meilleure information.

Les actions conseillées au C.N.R.S.

Des travaux du groupe « études économiques et énergie » se dégagent un certain nombre de propositions dont beaucoup ont été déjà mentionnées ci-dessus. On les trouvera, présentées par leurs auteurs, dans les annexes. Leur confrontation appelle d'abord quelques remarques générales :

• il est souhaitable d'intensifier les recherches dans les domaines où le C.N.R.S. se trouve déjà en bonne posture et bénéficie d'une certaine « image de marque ». Par exemple, les recherches sur les énergies non polluantes, en particulier l'énergie solaire, ont été plusieurs fois citées. Parmi les axes de recherches conseillés au C.N.R.S., on retiendra aussi les problèmes liés au coût de transport de l'énergie sous toutes ses formes, il reste encore beaucoup à faire pour mieux connaître et mesurer les pertes qui interviennent au cours du transport, de la transformation, de l'utilisation, etc...

En matière d'économie de l'énergie, les principales recommandations recourent les préoccupations des chercheurs concernés au sein du C.N.R.S. : mesure de la consommation, définition d'un système d'équivalence, relation entre énergie et système social, calculs d'optimisation, problèmes de tarification... Plusieurs participants ont insisté sur la nécessité d'une modélisation à l'échelle mondiale des problèmes de l'énergie dans leur ensemble. De tels modèles doivent prendre en compte pour chacune des formes d'énergie les problèmes de production, d'échange, de consommation, de transformation, de prix, etc... Ils permettraient d'avoir une meilleure vue d'ensemble des différents scénarios et de tester la sensibilité des résultats aux hypothèses retenues.

Par ailleurs, il n'est pas sûr que le C.N.R.S. doive se contenter d'actions de recherches susceptibles de retombées utilitaires seulement dans le long terme. Plusieurs participants ont exprimé un avis différent, estimant que des actions ponctuelles devraient aussi être entreprises dans un esprit de collaboration interdisciplinaire, en couvrant un large éventail : mise en valeur de nouvelles ressources, mise au point de nouveaux procédés de transformation de l'énergie, économies d'énergie notamment grâce au recyclage, stockage de l'énergie.

On notera d'ailleurs que certaines recherches à caractère tout à fait fondamental peuvent fort bien présenter en même temps une utilité assez immédiate. C'est le cas, par exemple, du problème méthodologique de l'évaluation de la consommation d'énergie, ou encore de la théorie des prix publics, pour s'en tenir aux études économiques. C'est dans le souci de favoriser de telles recherches que le C.N.R.S. a lancé en 1974 une action thématique programmée sur le thème « problèmes socio-économiques de l'énergie ».

Une meilleure coordination entre les recherches conduites par les divers spécialistes est vivement souhaitée. De cette idée souvent développée, et dont les im-

plications sont multiples, on ne retiendra ici que deux ou trois aspects particulièrement importants :

- collaboration entre ingénieurs et chercheurs des sciences exactes,
- interpénétration des problèmes technologiques et des problèmes économiques dans les calculs d'optimisation,
- coordination entre les sciences sociales, notamment en vue d'une approche systématique de la réalité sociale dans ses rapports avec le problème de l'énergie,
- utilité, à tous les niveaux, du recours à l'informatique et à l'automatique.

A partir de ces quelques remarques générales et des multiples recommandations faites au C.N.R.S., est-il possible de définir d'emblée les grands axes de recherches qui doivent être préconisés en priorité ?

Il serait prématuré de le faire sans un examen de l'état actuel des recherches en France et à l'étranger, de manière à inventorier les « créneaux » dans lesquels le C.N.R.S. pourrait utilement s'insérer, compte tenu de sa vocation propre et de ses moyens matériels et humains. Il est donc suggéré à la direction du C.N.R.S. de constituer une équipe pilote, composée pour une bonne part d'informatiens, et d'automatiens à qui serait confiée la mission de conduire en six ou huit mois une analyse multi-critères aux trois niveaux suivants :

- inventaire des recherches possibles dans tous les domaines concernant l'énergie. Une première documentation de base peut être rassemblée à partir des propositions et des études prospectives émanant de diverses organisations françaises ou étrangères. Certains de ces documents présentent même une évaluation partiellement chiffrée des coûts et avantages à attendre de chaque action de recherche envisagée.
- inventaire des recherches effectivement entreprises, en utilisant notamment l'abondante documentation d'ores et déjà rassemblée par certaines firmes énergétiques.
- simulation, pour le cas français, de l'avenir énergétique, en fonction de quelques hypothèses jugées vraisemblables. Ce dernier point est indispensable si l'on souhaite que les activités de recherche en matière d'énergie soient orientées de préférence dans des directions qui rejoignent certaines préoccupations nationales.

Edmond LISLE
Directeur scientifique
au C.N.R.S.

synthèse des débats

M. Soisson

Messieurs, je viens avec vous tirer les conclusions de cette journée d'étude et je souhaiterais, si vous le voulez bien, vous entendre pour vous demander votre sentiment sur les travaux qui ont été conduits aujourd'hui avant que nous nous efforçions de tirer les éléments d'une synthèse.

M. Chabbal

Monsieur le Ministre, nous avons voulu présenter aujourd'hui le travail de groupes mixtes d'ingénieurs et de scientifiques qui, domaine par domaine, ont défini la limite de nos connaissances et de notre compréhension, et qui, par conséquent, nécessitait de la recherche fondamentale. Il n'est pas dans les intentions du CNRS de dire, quels sont les choix à faire dans les solutions à court terme ou à moyen terme, je crois qu'il faut insister à ce sujet ; ce n'est pas d'une telle réunion, à notre avis, que peuvent sortir des choix sur les solutions à la crise de l'énergie. Le CNRS a besoin d'un cadrage, qu'il attend d'une concertation nationale au niveau du gouvernement et au niveau, en particulier, de la délégation générale à l'énergie et de la DGRST ; j'insiste là-dessus parce que nos chercheurs, c'est certain, ont envie de travailler dans le domaine de l'énergie. Mais ils ont envie de travailler de manière efficace dans une direction où on leur assure que cela en vaut la peine. Ces réponses, nous ne pouvons les donner que si le CNRS est confronté dans ce choix national. Je voudrais faire une seconde remarque, sur la présentation des travaux des groupes. Il nous est, en effet, apparu essentiel de prendre le risque de donner, dans une journée, une vue d'ensemble sur les 250 sujets ou plus qui avaient été retenus. Nous avons choisi de vous donner cette vue d'ensemble, parce que chacun a tendance à travailler dans son domaine en sous estimant l'intérêt des domaines voisins et qu'il apparaît évident, que nous avons affaire à un système global et que chacun des chercheurs doit connaître l'intérêt des domaines voisins. Alors, nous espérons effectivement, qu'un des résultats essentiels de cette journée sera que chaque chercheur aura l'impression de faire partie d'un plan d'ensemble.

M. Curien

Il me semble que l'une des conclusions de la réunion d'aujourd'hui, est la nécessité absolue de continuer et de renforcer nos recherches fondamentales dans

le domaine de l'énergie, par des recherches finalisées sur ce que l'on connaît ainsi que sur des finalités industrielles et économiques qui nous apparaissent maintenant claires. Nous avons pris un certain nombre d'options pour réussir, il faut mettre au point un certain nombre de matériaux, et améliorer certains procédés, il faut aussi essayer de mieux comprendre les phénomènes physico-chimiques qui sont à la base des exploitations. C'est une première voie qui est bien tracée, claire parfois difficile, mais là les choix peuvent et doivent venir, comme l'a dit M. Chabbal, d'un plan à l'échelon de la nation. Quand on parle, même en 1974, de « l'horizon 2000 », il est bien évident que d'ici « l'horizon 2000 », en dehors des voies qui nous paraissent actuellement naturelles et prometteuses, on en trouvera sans doute d'autres, et il faut absolument que des organismes tel que le CNRS aient un ensemble de recherches qui s'attache à la connaissance elle-même. Et d'autre part, dès que quelque chose apparaît, de mettre le moins de temps possible pour le faire déboucher vers l'innovation. Ainsi, si en 1930 période qui marquait le début de la neutronique, on avait eu une séance comme celle d'aujourd'hui, on aurait pensé aux réacteurs neutroniques.

M. Soisson

Je voudrais, si vous le voulez bien, tirer pour ma part quelques conclusions de vos travaux d'aujourd'hui. Cette journée me paraît tout d'abord manifester une ouverture tout-à-fait souhaitable et nécessaire du CNRS vers le secteur économique. Que vous soyez réunis ensemble dans cette salle, scientifiques et représentants du secteur socio-économique, et travaillé ensemble, est extrêmement prometteur et c'est là sans doute que peut se trouver la solution au difficile problème que vous avez abordé. Je crois ensuite, qu'il faut sans doute élargir le débat sur de véritables scénarios de solutions diverses à la crise de l'énergie. Il est nécessaire d'aller plus loin dans cette voie et c'est probablement en étudiant de tels scénarios que l'on peut trouver des voies nouvelles aux différents problèmes que vous avez abordés. Par ailleurs, je rejoins tout-à-fait ce que M. Deluzarche a dit tout-à-l'heure sur la dualité du problème des matières premières et de l'énergie et de la difficulté de situer la frontière entre l'un et l'autre : ceci doit être pour nous, l'un des éléments essentiels de la réflexion que nous devons ensemble mener.

Le deuxième aspect qui paraît fondamental, et a été nettement affirmé par les uns et les autres, c'est l'aspect pluridisciplinaire des thèmes qui ont été abordés et notamment la collaboration étroite qu'ils impliquent entre les physiciens et les chimistes. Cela ressort de toutes vos interventions d'où, sans doute, l'importance qu'il convient d'accorder, dans la planification nationale, à ces deux disciplines. Je rejoins aussi M. Chabbal car vous avez besoin d'un cadrage national et il nous appartient, sur le plan du gouvernement et en liaison avec tous les organismes, de le définir mais je crois que l'on n'a pas réservé actuellement, dans la planification, à la physique et à la chimie, la place tout à fait fondamentale qu'elle devrait avoir dans nos études sur le problème de l'énergie, de même qu'il n'a pas été réservé non plus, jusqu'à présent, à l'aspect modélisation et analyse des systèmes, le rôle qu'il devait assurer. Il y a là, à mon avis, deux possibilités nouvelles d'évolution que nous devons ensemble creuser.

Le troisième point, de cette journée et des travaux qui l'ont précédée, traitait du caractère dynamique et continu de la réflexion engagée par le CNRS. Il est fondamental, que cette réflexion puisse se poursuivre, et vous avez raison M. le Délégué Général, de rappeler que, si en 1930 de telles journées s'étaient tenues, peut-être que certaines orientations auraient pu être prises par l'économie nationale.

Il faut d'ailleurs que cette réflexion soit poursuivie en quelque sorte vers l'aval, en raison, notamment, de ce que vous avez souligné les uns et les autres, c'est-à-dire la très longue durée de la crise de l'énergie et surtout la très longue durée pour dégager des solutions nouvelles et je souhaite, pour ma part, que quelques études de scénarios comme celui qui pourrait être consacré à une société à bas profil énergétique puissent être menées par le CNRS dans une collaboration étroite entre la physique, la chimie et aussi avec M. Lisle : donc une réflexion continue mettant l'accent sur le caractère pluridisciplinaire de vos études. Une réflexion permettant une très large ouverture du CNRS et de la recherche fondamentale sur le secteur socio-économique. Ce sont, pour ma part, les trois conclusions essentielles

que je voudrais tirer de cette journée. Elles débouchent toutes sur une importance plus grande à donner aux problèmes que nous avons abordés, et au secteur de la physique et de la chimie dans l'élaboration de la planification nationale, donc dans l'élaboration du VII^e plan.

Je voudrais maintenant demander à M. Doumenc, et à M. Curien de regrouper les principaux thèmes qui ont été abordés, d'en faire la synthèse pour reprendre en quelque sorte l'expression de M. Chabbal, de dégager les motivations ou les propositions fondamentales sur lesquelles notre réflexion pourrait se poursuivre au cours des prochains mois.

M. Doumenc

Je voudrais commencer, M. le Ministre, par dire un mot de la difficulté qui s'attache à des choix, et reprendre ce qui a été dit par vous-même, ainsi que par d'autres sur l'ouverture d'esprit qui est à cet égard nécessaire sur le plan de la recherche fondamentale. Si je fais cette courte digression par rapport au résumé que vous souhaitez, c'est qu'il a été demandé au comité consultatif, le CCRDE dont M. Lagasse a parlé, placé auprès des deux délégations générales à la recherche scientifique et à l'énergie, de faire une première esquisse de ces choix ; et je dois dire que le comité est constitué d'un éventail très large qui va d'un directeur du CNRS jusqu'à des responsables très directs de l'industrie en passant par de nombreux organismes de recherches spécialisés et concernés par le problème pour, d'une part, souhaiter qu'en matière fondamentale une très grande continuité soit assurée en fonction de ce qui est la base de telles recherches, c'est-à-dire les équipes existantes et les programmes engagés. Il y a quelques 120 ans, le monde entier s'est trouvé angoissé par le drame de la Méduse, drame qui a pu se produire en quelque point du globe sans que l'ensemble de l'humanité en soit informé et puisse intervenir, faute de moyens scientifiques qui permettraient de communiquer à distance. L'histoire veut, qu'à cette même époque, un homme ignorait tout de ce drame et des sables mouvants de la Mauritanie. Cet homme s'appelait Cauchy et écrivait que $2^2 = -1$; c'était une idée très curieuse à l'époque, qui devait être à la base, pour une bonne part, du développement en radio-électricité et en matière de communication par T.S.F. C'est dire que l'orientation des recherches fondamentales, est bien souvent un leurre, et le CCRDE a demandé que la plus grande continuité et la plus grande ouverture soient données sur le plan fondamental. Mais il a cru de son devoir de ne pas hésiter à faire des choix, pour l'apport de la recherche, sur des sujets à court ou moyen terme et ainsi à prendre l'horizon 85 comme un horizon guide pour de telles réflexions. Or, l'horizon 85, c'est

vraiment demain et ce qui peut être efficace en 85 doit être mis en œuvre dans les trois ou quatre années à venir. Nous avons quand même pensé qu'en premier objectif, donc vraiment à très court terme, la recherche devait aider à cadrer l'ensemble des volontés pour aider à remédier à la crise de l'énergie, car même dans ces domaines à court terme, l'apport de la recherche de base pour reprendre le terme du professeur Lagasse est fondamental pour nous industriels. Et je dois dire, M. le Ministre, que cela me permet très facilement de vous résumer en très grands traits ce qu'ont été les interventions de la matinée. La matinée était orientée sur les économies possibles d'énergie et la valorisation de cette énergie. Nous avons d'abord pris conscience de ce que vous indiquiez tout-à-l'heure et de ce que vous signaliez après l'intervention de M. Deluzarches : c'est que l'énergie proprement dite, l'économie d'énergie que comporte la manière de traiter les matières premières, et les sources même de matières premières étaient profondément liées. Nous avons quand même souhaité qu'un effort soit fait pour classer un peu les choses et orienter les axes de recherche de manière que l'on ne confonde pas tout. Nous avons passé en revue un certain nombre de problèmes concrets et dégagé des axes sur lesquels la recherche fondamentale était directement appelée à aider cette action à court terme. Et il est apparu, à l'évidence, que les processus chimiques, les orientations de base devaient être revues en fonction de nouvelles données, comme l'économie d'énergie et que, par conséquent, tout devait être repensé à la fois dans les origines de l'énergie, dans les manières de l'utiliser et dans la mise en œuvre des procédés industriels.

M. Curien

Je prends le relais si vous voulez bien M. le Ministre, pour parler de la séance de cet après-midi, au cours de laquelle nous avons envisagé en particulier les nouvelles sources d'énergie et les vecteurs nouveaux. Là, nous nous sommes aperçus qu'il y avait beaucoup à inventer encore dans ce domaine et que des idées venant d'un certain secteur scientifique pouvaient également être appliquées dans un autre. En particulier, un de nos conférenciers nous a montré comment, en emplissant des petits photons, on pouvait en faire un grand. Ceci est le principe de la photosynthèse que l'on ne comprenait pas bien il y a encore quelques années. Cela peut donner des idées dans d'autres domaines qui n'auraient peut-être rien à voir avec la photosynthèse, mais nous avons le sentiment que l'ensemble des recherches scientifiques, aussi bien en chimie, en physique, qu'en biologie procède, à peu près, du même esprit, que les échanges entre les différents spécialistes sont de plus en plus fructueux. Bien sûr,

nous avons parlé du choix des meilleurs systèmes : comment, à partir d'une même énergie primaire, atteindre l'utilisateur en faisant le moins de transformations possibles ou, en tout cas, en faisant les transformations qui amènent à un rendement global qui soit le meilleur possible. Nous avons affaire à des études de caractère scientifique et technique mais aussi à des études économiques, et l'ensemble du rapport de M. Lisllo nous en a montré l'importance en ce qui concerne l'énergie. A la suite d'une intervention d'un de nos excellents collègues M. Magat, nous avons repris conscience de la nécessité, dans les réflexions sur les nouvelles sources et les nouveaux vecteurs d'énergie, de préserver le milieu, non seulement pour notre entourage, mais pour les gens qui auroient encore, nous l'espérons, des chances d'être heureux dans 500-1000 ans ou plus. Nous avons la responsabilité, car nous nous engageons délibérément dans des processus dont nous ne sommes pas vraiment maîtres, des conséquences correspondantes. Je ne veux pas rappeler les points scientifiques les plus importants qui ont été énoncés, car ceci aurait plutôt caractère de catalogue. Je voudrais peut-être en conclusion dire que, dans ces affaires, il nous est apparu que des actions concertées étaient tout-à-fait nécessaires. M. Lagasse a parlé, ce matin, de centaines de millions de dollars, et en France on me dit : « les Allemands mettent des centaines de millions de francs là-dessus » et quand je suis en Allemagne on me demande : « comment faire pour former les laboratoires et pour retrouver de l'argent ». De l'argent, il en faut, j'en suis bien d'accord et je suis sûr que M. le Ministre en est bien conscient, et croyez bien que nous faisons notre devoir en rappelant à nos dirigeants, que nous avons la tâche de conseiller, et que sans argent on ne peut pas faire de science. Mais, je pense aussi que dans le domaine qui nous intéresse, les actions incitatives peuvent avoir un effet multiplicateur très considérable, car comme les uns et les autres l'ont rappelé, le CNRS, les universités, les grands organismes de recherche et au tout premier rang duquel il y a le commissariat à l'énergie atomique, ont un potentiel humain et un potentiel d'équipement très considérables, et quelque fois, il suffit d'une aide incitative relativement faible pour qu'un processus se déclenche par réunion de plusieurs équipes.

Nous sommes tous prêts à initier ces échéances et nous comptons sur vous pour nous dire quels sont les endroits où sont les briquets.

M. Soisson

Il ne me reste plus en conclusion qu'à féliciter le CNRS de la tâche qu'il accomplit et qu'il accomplit avec vous tous. Je vous remercie d'avoir participé à cette journée.

ANNEXES

TABLEAU I

GROUPES DE CHIMIE

GROUPE DE CHIMIE

TABLEAU II

GROUPES DE PHYSIQUE CHIMIE

TABLEAU II (Suite)

GROUPES DE PHYSIQUE CHIMIE

TABLEAU II (Suite)

GROUPE DE PHYSIQUE CHIMIE

TABLEAU III

GROUPÉ DE PHYSIQUE
TABIFAIL III (Suite)

Université de Tunisie 3 ^{er} de l'Enseignement Universitaire	Formation d'enseignants à l'Université Tunisien	Formation d'enseignants à l'Université de Tunisie et à l'Université d'Enseignement Supérieur	Formation d'enseignants à l'Université de Tunisie et à l'Université d'Enseignement Supérieur	Formation d'enseignants à l'Université de Tunisie et à l'Université d'Enseignement Supérieur
Chambre de l'Enseignement Supérieur et de la Formation Professionnelle et de la Recherche et de la Technologie	Formation d'enseignants à l'Université Tunisien	Formation d'enseignants à l'Université de Tunisie et à l'Université d'Enseignement Supérieur	Formation d'enseignants à l'Université de Tunisie et à l'Université d'Enseignement Supérieur	Formation d'enseignants à l'Université de Tunisie et à l'Université d'Enseignement Supérieur

TABLEAU IV

L'industrie chimique et la France dans le contexte international 103

