



PONTIFICIA
ACADEMIA
SCIENTIARVM

COMMENTARII

Vol. III - N. 10

pag. 1-20

REMARQUES SUR L'ENERGIE ET SUR QUELQUES MOYENS PROPOSES POUR REMEDIER A LA PENURIE ACTUELLE

JEAN LECOMTE
Académicien Pontifical

Monsieur le Président, Excellences,

Dans la présente conjoncture, très défavorable en ce qui concerne le pétrole, on cherche à trouver, par tous les moyens, les sources d'énergie absolument nécessaires. Les Gouvernements s'emploient activement à étudier des solutions de rechange, car la crise actuelle a toutes les chances de durer. Dans chaque pays, les dirigeants se trouvent dans une position particulièrement délicate, au milieu de l'avalanche de suggestions qui leur sont proposées, car ils doivent procéder à des choix dans un délai très bref, engageant l'avenir pour plusieurs décennies, surtout que l'enveloppe globale pour les besoins énergétiques est plate et que son contenu reste non moins incertain.

Communication présentée à la Séance plénière du 18 avril 1975 à l'Académie Pontificale des Sciences.

Plus que jamais l'existence de l'homme dépend de l'énergie, aussi bien dans les pays industrialisés que dans ceux en cours de développement. N'étant pas un spécialiste de toutes les sources d'énergie, mon propos sera, non pas d'entrer dans les détails des différentes techniques mais surtout de rechercher, en quelque sorte, la philosophie de ces techniques. Dans chaque pays, il existe des personnes particulièrement compétentes dans les problèmes qui nous intéressent. C'est à eux que s'adresseront les Gouvernements, ceux-ci composés d'hommes politiques, pour la plupart de formation littéraire ou économique. Les experts devront être choisis indépendamment de leurs opinions politiques et aussi, libres d'attaches sur le plan économique, tout en représentant un éventail assez vaste de spécialités. C'est vraisemblablement en s'adressant aux Académies Scientifiques que l'on opérera les choix les meilleurs, en établissant une collaboration avec les dits experts. C'est une des raisons qui nous ont amené à proposer ce sujet à l'Académie Pontificale des Sciences.

Le choix des arbitres est difficile, car des considérations humaines, économiques ou écologiques prennent le pas sur les questions scientifiques proprement dites. Il faudra résoudre cette grave crise en tenant compte des ressources en matières premières, des installations existantes et aussi de la capacité d'industrialisation et de production des pays concernés. Nous passerons ainsi en revue certaines techniques de remplacement, dont nous n'avons pas la prétention de donner une liste exhaustive.

Si l'on examine successivement les techniques proposées, on arrive très rapidement à la conclusion qu'*aucune d'elles ne s'applique exclusivement de préférence aux autres*. Aussi, dans tout ce qui va suivre, nous supposerons que l'on fera appel à un nombre raisonnable de solutions. Chacune d'elles pourra apporter peut-être seulement quelques centièmes de l'énergie recherchée, mais aucune ne devra être négligée « a priori ». Cette méthode de décomposer le problème général, parfaitement insoluble en bloc, procède du plus pur esprit cartésien.

La technocratie, au contraire, a cherché à résoudre le problème dans son ensemble en faisant appel à un nombre de méthodes limité.

Dans ce propos, nous n'étudierons pas le charbon, avec l'amélioration de son extraction et les différentes manières de produire du gaz ou des combustibles liquides, dérivés du charbon. On peut simplement rappeler que les centrales de même puissance que des centrales atomiques conduisent à une pollution bien plus importante.

En premier lieu, n'existe-t-il pas de procédés pour mieux utiliser les ressources dont nous disposons? Citons seulement des essais concluants poursuivis pour la récupération de l'essence provenant des gaz actuellement brûlés, nuit et jour, dans les torchères accompagnant les champs de pétrole. Par suite du prix élevé atteint par les hydrocarbures, l'expérience montre que l'affaire se présente comme rentable, et ce d'autant plus que l'installation est importante.

L'utilisation de l'essence dans des moteurs d'automobile ou d'aviation pourrait s'effectuer avec une économie non négligeable. Dès 1926, c'est-à-dire, une douzaine d'années avant les américains, nous avons mis au point, par spectrométrie infrarouge, une méthode permettant de déterminer les constituants d'une essence.

La méthode, que nous avons appliquée un grand nombre de fois, consiste à séparer par distillation les fractions d'une essence qui passent aux différentes températures. On arrive, en procédant soigneusement, à obtenir des fractions qui ne contiennent pas plus de trois ou quatre constituants. S'il s'agit d'un test qualitatif, qui suffira dans la plupart des cas, on dressera un tableau dans lequel on porte les spectres d'absorption infrarouge de chaque fraction en fonction des températures. On peut ainsi suivre la variation dans la composition des fractions. En repérant l'apparition de certaines bandes caractéristiques, et avec un peu d'habitude, on reconnaît facilement la présence d'hydrocarbures aliphatiques diversement ramifiés, d'hydrocarbures benzéniques avec des chaînes aliphati-

ques en différentes positions de substitution etc... Pour faciliter les interprétations, nous avons enregistré les spectres infrarouges d'absorption d'un assez grand nombre d'hydrocarbures de différents types, pris à l'état pur. En constituant ainsi une sorte d'atlas, on peut arriver à des déterminations, non plus qualitatives mais quantitatives. Les concentrations, dans un mélange, se déterminent d'après les indices d'extinction correspondant à certaines bandes infrarouges prises comme caractéristiques. Les coefficients d'extinction des hydrocarbures et les absorptions réellement mesurées dans le spectre permettant d'établir des équations du premier degré, dont la résolution conduit aux concentrations cherchées. On a même imaginé de constituer des circuits électriques correspondant aux indices d'extinction des hydrocarbures et aux absorptions expérimentales. Les concentrations cherchées s'obtiennent lorsque les circuits électriques entrent en résonance.

Cette méthode a rendu d'importants services aux anglais et aux américains pendant la deuxième guerre mondiale. Avant l'invasion de la France, nous avons fait passer en Grande Bretagne tous les documents et les méthodes d'emploi. Si bien que quand nous revîmes, en 1945, nos collègues, ils nous ont assuré que la méthode infrarouge constituait réellement un outil remarquable pour caractériser les différentes catégories d'essences. Il s'agit donc d'une méthode éprouvée sur un plan industriel.

Actuellement, cette technique peut être complétée par la spectrométrie de masse, qui n'existait pas au moment de nos recherches sur les hydrocarbures. Mais, dès la découverte de l'effet Raman, en 1928, nous avons reconnu, avec beaucoup d'autres, qu'il constituait le complément indispensable de la spectrographie infrarouge, quoique se présentant comme d'un usage moins général et avec des difficultés d'expérimentation (cas des hydrocarbures fluorescents ou solides).

La connaissance d'un nombre suffisant de constituants et de leurs structures moléculaires permet d'aller beaucoup plus loin dans les utilisations avec les moteurs. En effet, nous avons

mis en évidence vers 1936, une nouvelle espèce d'isomérisation, extrêmement répandue. Il s'agit de l'existence de « rotamères ». Ils se présentent lorsqu'autour d'une « simple liaison » il existe un certain nombre de rotations discrètes. Jusqu'alors, on concevait seulement dans de nombreux cas, qu'il existait autour d'une « double liaison », une isomérisation *cis-trans*. Elle est bien connue et l'on sait séparer souvent, les isomères *cis-trans*. Mais, pour les « rotamères », il n'est pas possible de les obtenir purs: ils se transforment spontanément les uns dans les autres, suivant les conditions de température, d'état, de dilution... Leur nombre ne dépasse pas deux un trois, et il n'existe aucun espoir de séparer les « rotamères » purs les uns des autres.

Donc, pour les essences d'automobile ou d'aviation, les formes possibles (rotamères que l'on peut prévoir) seront dès lors, différentes suivant la composition et la température à laquelle sera portée cette essence. Elle pourra présenter, relativement à la compression, des propriétés très variées. Le rendement d'un moteur se trouvera visiblement accru ou diminué, si l'on a affaire à des températures ou des conditions de fonctionnement variées.

Pratiquement, nous proposons de procéder à un raffinage plus soigné que celui auquel on est habitué. Naturellement, il ne s'agit pas de préparer des fractions d'hydrocarbures comme pour les spectres d'absorption infrarouge, ne contenant que quelques composants dans chaque fraction. Mais, au lieu de vendre de l'essence « super » ou de l'essence « ordinaire », on aurait un nombre restreint de qualités mieux définies. Il est certain que les rendements seraient meilleurs si l'on pouvait les employer, dans des moteurs spécialement calculés pour ces mélanges d'hydrocarbures. Reste à savoir si le raffinage plus soigné que celui qui se prépare pour les pompes et si la multiplication consécutive des pompes conduirait, à des frais justifiés par un meilleur rendement des moteurs spécialement prévus pour ces qualités variées de combustible. Cette complication de la distribution serait valable à l'échelle des grandes industries.

L'énergie éolienne peut fournir de l'électricité dans des

endroits actuellement difficiles à atteindre, mais elle demande une utilisation sur place de l'énergie produite et son stockage pour parer à l'irrégularité du vent. Une de ces applications les plus directes consiste à élever l'eau ou à faire travailler le vent dans une turbine. La production d'électricité, pour des applications locales et réduites, est prévue jusqu'à quelques centaines ou quelques milliers de watts avec des prix de 3.000 à 5.000 frs. L'avantage sur l'énergie solaire résulte de ce que le vent souffle le jour aussi bien que la nuit; mais cette source d'énergie est capricieuse et diluée.

Il s'agira certainement d'un faible appoint, mais indéfiniment renouvelable ne produisant pas de pollution, mais donnant lieu à un bruit plus ou moins prononcé. On a proposé, pour une meilleure utilisation de l'énergie éolienne, de créer de hautes tours, peu esthétiques dans le paysage, dans lesquelles serait aspiré le vent. Une autre utilisation plus simple consiste à surmonter les « maisons solaires » d'une éolienne.

On peut arriver à des quantités considérables d'énergie en recourant aux *nombreuses chutes d'eau* que l'on pourrait équiper. Il serait seulement absolument nécessaire que les compagnies d'électricité aident directement les installateurs de barrages, alors que, dans certains pays, elles font jouer un monopole en fixant, par exemple, un prix trop bas pour l'électricité achetée aux installateurs, qui se trouveraient disposer de courant électrique pendant des périodes creuses, soit journalières, soit réparties sur un plus long délai. Il semblerait qu'en 1980, plus de 99% des ressources hydrauliques, seraient utilisées soit 58.10^{12} watts heures (térawatts heures, le maximum se plaçant vers 64.10^{12} watts heures disponibles.

J'ai connu des moulins à eau, qui établis le long d'un ruisseau possédant une faible pente, faisaient tourner des meules pour moudre le grain et qui auraient pu actionner des moteurs. Installations simples ne demandant que peu d'entretien et produisant une pollution nulle.

L'utilisation directe de l'énergie des vagues ne semble pas au point, mais le recours à des usines marées-motrices donne d'excellents résultats déjà depuis plusieurs années. Il exige des travaux considérables et l'existence de marées assez importantes: ils ne se trouvent qu'en des points fixes qui restent, malgré tout, assez peu nombreux dans le monde. On peut craindre que la construction d'énormes barrages ne risque de modifier le régime des marées. Cette méthode, qui demande des investissements considérables, donne, par contre, des résultats illimités dans le temps.

L'usine marée-motrice de la Rance permet d'atteindre 340mw. Elle a correspondu exactement aux prévisions de puissance et de dépense de la production totale d'énergie française. Depuis sa mise en fonctionnement, elle n'a demandé que des frais d'entretien négligeables. A la suite de ce succès, des études pour procéder à l'aménagement des îles Minquier et des Ecrehoux et de la baie de Fundy au Canada sont à l'étude tant pour la puissance d'électricité sur laquelle on peut compter, que pour les dépenses assez considérables qu'il faut envisager, ainsi que des délais de construction de plusieurs années.

Rappelons que Georges Claude a réussi à faire fonctionner une machine thermique avec seulement une vingtaine de degrés de différence entre la source froide et la source chaude. La vapeur d'eau à 28°C, par exemple, passant dans une turbine, donne une énergie énorme. Il suffit de faire le vide à un centième d'atmosphère dans les récipients contenant cette eau, pour que celle-ci se mette à bouillir et vienne se condenser dans un autre récipient refroidi à 4 ou 5°C.

Donc, il existe, en des points bien choisis, la possibilité d'avoir le froid des pôles et la chaleur tropicale réunis. C'est une température merveilleusement constante en toutes saisons

(¹) Montant à 15,8% de la production totale d'énergie française, en cas de réalisation d'un premier barrage.

et par tous les temps, appliquée respectivement à l'eau des profondeurs indéfiniment refroidie par les courants venus des mers polaires et à l'eau de la surface perpétuellement réchauffée par le soleil.

La difficulté d'établir une canalisation de très grand diamètre, amenant en surface l'eau des profondeurs, a empêché la mise en oeuvre, à grande échelle, de cette méthode ingénieuse, dont on a reconnu tout l'intérêt, à cause du prix élevé du fuel. Si des forages pouvaient avoir lieu dans une région possédant, entre le fond et la surface, une différence d'une vingtaine de degrés, on pourrait penser arrimer à la plate-forme, destinée aux forages, la grosse canalisation amenant l'eau des profondeurs; on remédierait aux ruptures qui ont tellement gêné Georges Claude. On ferait d'une pierre deux coups. L'énergie ainsi produite est intransportable, sauf après sa transformation en électricité ou en hydrogène; mais ne conduit à aucune pollution.

L'énergie solaire, n'amenant aucune pollution, peut s'utiliser directement sur place pour le chauffage d'une maison, ou bien indirectement par transformation en électricité, en installant, par exemple, des panneaux au silicium, qui sont couplés à un moyen de stockage. Les revues d'architecture contiennent des dispositifs à circulation d'air pendant le jour et les périodes d'ensoleillement. Le toit sera, par exemple, formé de feuilles de zinc (matériaux peu coûteux), noirci ou non, suivant les idées de mon Maître Charles Fabry. Le zinc semble préférable à beaucoup d'autres matériaux. On connaît, d'autre part, exactement, sous les diverses latitudes et suivant les saisons, l'énergie solaire qui arrive sur notre globe. On peut ainsi prévoir un bilan énergétique. Le stockage en chauffant les pierres d'une citerne en sous-sol permet d'utiliser les 2/3 ou les 3/4 des calories produites, en recourant à un système de ventilation, qui permet de répartir la chaleur au moment voulu.

L'effet de serre, obtenu avec de l'air, de l'eau, du verre, etc... consiste en ce que le rayonnement solaire est transmis par ces matériaux, puis transformé en rayonnement de plus grande

longueur d'onde, qui se trouve arrêté et ainsi empêché de retourner dans l'atmosphère. Le phénomène joue, ainsi qu'on le sait, un grand rôle dans l'utilisation du rayonnement solaire.

La conclusion du Colloque, tenu à l'UNESCO à Paris, il y a un certain nombre de mois, montre que le soleil n'est pas une énergie entièrement gratuite, mais ses avantages et ses inconvénients, maintenant bien analysés, devraient permettre de se lancer dans des applications sectorielles précises. Les travaux sur le captage de l'énergie solaire, malgré son intérêt certain, restent ridiculement peu nombreux en regard des études pour la recherche pétrolifère ou le développement des centrales nucléaires. Les réalisations existantes, dues à la persévérance des ingénieurs, sont restées presque à l'état de prototypes. Les crédits ont manqué pour généraliser des systèmes parfaitement compétitifs.

On peut aussi procéder à la transformation de l'énergie solaire comme nous l'avons mentionné, directement en électricité, en utilisant, par exemple, des cellules à base de silicium (plus ou moins raffiné pour économiser son prix), à sulfure de cadmium ou au tellure de gallium plus coûteux). Elles sont disposées sur des panneaux, couplés à un moyen de stockage (accumulateurs qui espèrent toujours un perfectionnement ou dispositif électronique de contrôle). Il suffit de rappeler les services que ces cellules rendent dans le cas des satellites. Les générateurs solaires sont maintenant compétitifs, tant en ce qui concerne le prix que la qualité de l'électricité produite.

Une application inattendue de l'énergie solaire consiste à utiliser le rayonnement dans l'espace, par un ciel clair, d'un corps noir soigneusement isolé pour éviter les pertes par convection et conduction. On le recouvre d'un film de polyéthylène, de coût très faible. L'échange se fait par les « fenêtres » de l'atmosphère, pour lesquelles ce matériel est transparent. On obtient ainsi une température inférieure à celle émise par l'atmosphère. Dans un pays chaud on peut préparer une source susceptible de descendre à -40°C . Elle peut servir de source froide dans une machine thermique et contribue à en augmenter

le rendement suivant le principe de Carnot. On pourrait alors masquer, pendant le jour, le dispositif qui rayonne dans l'espace pendant la nuit, et l'utiliser conjointement à une source chaude produite, pendant le jour, par le soleil, pour alimenter une machine thermique. Voir aussi la distillation de l'eau de mer.

Dans le proche avenir, le soleil constitue aussi une source peu coûteuse, inépuisable, sans danger et non polluante. La production de matières organiques, à partir de la photosynthèse, est considérée actuellement comme la plus importante source potentielle en matière énergétique. L'utilisation ferait appel à un système biologique photosynthétique, constitué par des algues poussant dans un bassin d'eau douce, lui-même alimenté en matière organiques par des égouts. De cette manière se trouverait consommée une partie importante des déchets organiques de l'égout. La photosynthèse produit des quantités relativement importantes de méthane et d'hydrogène. On a calculé que les déchets favorablement collectables (environ 15% du total) conduisent à prévoir un pouvoir énergétique équivalent à 3% de la consommation de pétrole aux Etats-Unis et à 5 ou 6% de la consommation de gaz de ce pays.

La conversion des produits de photosynthèse et des déchets organiques semble présenter une perspective très intéressante. Suivant le type de matière première et son homogénéité, les possibilités les meilleures sont présentées par la pyrolyse, l'hydrogénation et la fermentation anaérobie. Le méthane produit par les ordures ménagères paraît pouvoir soutenir la concurrence du gaz naturel d'importation en France.

Pour les combustibles obtenus à partir de productions végétales cultivées, il serait nécessaire de réduire les coûts, dès maintenant. Les combustibles obtenus par la conversion des déchets ne sont pas compétitifs. Mais cette conversion constitue, actuellement au moins, une évacuation intéressante des déchets.

Rappelons qu'il peut être utile de produire un effet de serre en recouvrant d'huile des bacs contenant les eaux d'égouts, méthode peu coûteuse et produisant une meilleure utilisation de l'énergie solaire.

Substances chimiques de remplacement. Il s'agit principalement de l'alcool éthylique et de l'hydrogène.

L'alcool éthylique, non hydraté, constitue un excellent carburant ayant un indice d'octane élevé, par conséquent susceptible d'être utilisé avec un haut rendement thermique dans les moteurs à explosion à rapport volumique élevé de compression. Mais son pouvoir calorifique est seulement de 7.000 calories, contre 11.000 pour l'essence, et sa chaleur de vaporisation élevée exige des moyens de réchauffage adéquats pour l'admission dans le moteur. Le meilleur parti que l'on peut tirer, se rencontre avec des mélanges d'alcool et d'essence à faible teneur en alcool, par exemple 10%. On obtient alors la meilleure combustion, assurant un léger gain de rendement, pour un volume de compression donné du moteur, et une résistance à la détonation qui autorise l'emploi d'un rapport volumique de compression plus élevé.

L'utilisation de l'alcool déshydraté ou même de l'alcool hydraté a déjà été proposé au cours de la première guerre mondiale. Sa combustion ne dégage pas de gaz toxiques et sa production n'est pas vouée à l'épuisement; car il est toujours possible, pour des zones de culture non rentables actuellement, de rechercher des substances spécialement adaptées à produire de l'alcool. Bien qu'il ne soit pas possible de substituer intégralement au pétrole l'alcool, bien employé, on peut jouer un rôle essentiel pour l'économie.

L'hydrogène semble susceptible d'apporter une solution clef, inséparable du monde d'aujourd'hui et de celui de demain: la disposition d'énergie facilement utilisable et le respect de l'environnement. Il peut fournir, par excellence, une source d'énergie chimique secondaire, accessible au départ de l'air et de l'eau. Les avantages thermodynamiques montrent l'intérêt d'un tel combustible, véhiculateur d'énergie, indéfiniment recyclable, puisqu'il restitue l'eau qui lui a donné naissance. La chaleur de réaction de l'hydrogène avec l'oxygène en fait le meilleur combustible en poids, avec un pouvoir calorifique trois fois supérieur aux hydrocarbures et quatre, cinq fois au charbon. Sa

température de flamme atteint 2.050°C avec l'air, et 2.700°C avec l'oxygène sous une atmosphère. Avec des rapports très élevés, les turbines hydrogène-oxygène conduisent à des rendements de transformation de l'énergie thermique en énergie mécanique de 70%. Par contre, l'hydrogène est un combustible particulièrement médiocre par suite de sa faible densité. Il a cependant constitué, pendant des décennies, 50% du gaz de ville (CO + H₂).

Il peut évidemment être utilisé comme combustible dans les moteurs à combustion interne avec des rendements faibles (30%). Le seul polluant, auquel il est susceptible de donner naissance, est l'oxyde d'azote NO. L'hydrogène est extrêmement répandu dans la nature, mais n'existe pas à l'état libre. On peut le préparer, soit par électrolyse de l'eau en utilisant une partie de l'énergie électrique produite, soit par élévation de température. L'action catalytique du mélange air + H₂ est encore plus aisée. Les propriétés physiques qui régissent ses aptitudes de stockage de sécurité sont à considérer de près, étant donné les propriétés du mélange tonnant.

Mais c'est l'activation électrochimique de l'oxydation de l'hydrogène, qui ouvre le domaine le plus révolutionnaire aux applications, car elle peut permettre, à partir d'une distribution d'hydrogène, le fonctionnement de sources d'énergies autonomes avec un rendement de 40 à 80%. Ces gains de rendement constituent un avantage qui compensait le coût autrefois plus élevé, de l'hydrogène par rapport aux combustibles pétroliers. Il n'est donc pas exclu de tableer sur une extension du cycle à l'hydrogène.

Les spécialistes n'ont pas attendu la crise actuelle du pétrole pour s'intéresser à la *géothermie*, qui figure en bonne place. Mais cette source d'énergie restera toujours locale et limitée. Elle n'est cependant pas négligeable. On compte qu'elle fournira, au mieux, les 4% des 3,3 millions de mégawatts, dont les Etats-Unis auront besoin en 1985.

Une poche magmatique se présente à quelques centaines ou quelques milliers de mètres au dessous de la surface de la

terre. La source de chaleur doit être surmontée de terrains perméables, de manière à recevoir l'eau de pluie, ces terrains perméables étant recouverts d'une couche imperméable. Elle scelle plus ou moins hermétiquement l'aquifère, qui chauffée par dessous a tendance à monter et à être brassée. La température de l'eau liquide ou en phase vapeur se trouvera généralement entre 200 et 400°C. Un forage permettra dès lors, à la couche aquifère, de s'échapper. Le gisement de Larderello en Italie constitue un des rares exemples de vapeur sèche, qui possède la précieuse propriété de pouvoir directement actionner les turbines d'une centrale électrique, sans être obligé de la débarrasser des gouttelettes d'eau. L'eau très chaude peut aussi servir à de multiples usages, à condition d'être débarrassée des sels dissous. On passera par l'intermédiaire d'un liquide, qui s'échauffera grâce à un échangeur, et qui pourra faire marcher les turbines, quitte aussi à récupérer les sels dissous et à réinjecter les eaux restées salées.

Les gisements d'eau chaude de basse énergie sont beaucoup plus fréquents que ceux de la vapeur. Ainsi, dans le Bassin Parisien, une couche de 7.000 km², permet d'obtenir à 1.500 ou 2.000 mètres de profondeur de grandes quantités d'eau chaude de 80 à 90°C, permettant d'être utilisée à bas prix dans des immeubles urbains, de fournir de l'eau chaude à usage piscicole, agricole ou domestique. On a aussi essayé d'injecter de l'eau ou tout autre liquide, en fracturant en profondeur des roches chaudes et sèches. Il y a risque de diminuer la température des roches chaudes ou même de provoquer un séisme non négligeable. Souvent la prospection des grands bassins sédimentaires se trouve facilitée par des forages exécutés par les pétroliers. A partir de 1985, on estime que l'on devrait économiser deux millions de tonnes de fuel, chaque année.

Energie atomique. En l'absence de fuel, elle constituerait probablement le meilleur procédé pour obtenir de grandes quantités d'énergie électrique avec tous les avantages de pouvoir la créer en n'importe quel endroit, si, dans l'état actuel, on ne risquait de faire un véritable pari.

Tout d'abord, la matière première se trouve en très grandes quantités sur la terre, à des profondeurs variables, mais les stocks calculables ne se montrent pas illimités, loin s'en faut. Ne va-t-on pas surpayer le combustible, l'uranium exploitable existant dans certains pays déterminés, et ne se trouvera-t-on pas dans une situation analogue à celle de l'essence, l'approvisionnement pouvant être coupé suivant la volonté des pays producteurs. La France semble moins dépendante pour l'uranium que pour le pétrole, en raison des réserves sur son sol et des arrangements avec plusieurs sources d'approvisionnement à l'étranger, en faisant de la prospection et en créant des sociétés d'exploitation. La France contrôlerait alors environ 20% des réserves mondiales d'uranium.

Pour l'utilisation de l'uranium, différents systèmes ont été étudiés et proposés, présentant chacun des avantages et des inconvénients. Si bien qu'aucun de ces systèmes ne semble s'imposer à l'exclusion des autres. Particulièrement significatifs se trouvent les passages d'un système à l'autre, ce qui prouve évidemment qu'ils sont remplaçables suivant les circonstances, les uns par les autres. On a considéré, en effet, la filière française « graphite gaz ». Actuellement, comme dans d'autres pays, on semble avoir abandonné l'uranium « national » au profit de l'uranium enrichi. A ce moment, on fait l'économie de la fabrication de l'eau lourde, pour laquelle des usines coûteuses sont nécessaires.

Ce que l'on recherche, en adoptant la méthode américaine, c'est de choisir une technique qui devrait marcher à coup sûr. La France a abandonné l'eau lourde: la Grande-Bretagne l'a essayée, semble-t-il, sans conclure. Le Canada paraît être le champion mondial des réacteurs à uranium naturel, suivi par l'Argentine, la Corée du Sud etc... Alors qu'au Canada, l'industrie généralement brillait par sa passivité, en Suède elle fait preuve d'un esprit d'initiative qui a modifié les chances du système adopté. En Finlande, il s'agirait d'uranium enrichi et d'eau bouillante.

Pour montrer que l'on n'est pas parvenu à une solution unique, il suffira de rappeler que l'enrichissement de l'uranium peut se faire par des méthodes très différents: la diffusion gazeuse et la sélection par gravitation. Pour séparer des isotopes aussi voisins que 235 et 238 (le premier étant seul actif et existant en bien plus faible quantité). Le laser offre maintenant des possibilités nouvelles et très remarquables pour concourir à cette séparation.

Actuellement, on a proposé d'améliorer la technique par le surrégénérateur, où l'on passe par le plutonium avec une couverture en uranium naturel. Aussi parle-t-on de surrégénérateur, qui produit plus de combustible qu'il n'en consomme. Il faut rappeler que le plutonium, en raison de sa toxicité, exige des précautions plus grandes qu'avec les autres méthodes atomiques. Les cas d'irradiation accidentelle ne sont cependant pas rares dans les installations nucléaires. Pour les « pépins » graves, on a calculé que leur fréquence se montre extrêmement faible et l'on a aussi tenu compte des sabotages possibles, ainsi que de l'influence des séismes. Il faut considérer le nombre des réacteurs en service. Les mesures officielles faites dans l'environnement des centrales actuelles n'ont donné qu'un accroissement négligeable d'un millirem. On a toujours peur d'un accident qui se traduirait par un désastre. Encore une fois, bien que sa probabilité soit extrêmement faible, il se crée une sorte de psychose, dès que l'on envisage l'établissement de centrales atomiques. Cependant, les populations, suivant les cas, acceptent le très faible risque avec l'installation d'une centrale en raison du travail créé par cette industrie, lorsque, dans d'autres cas, le refus reste total.

Jusqu'à présent, nous avons parlé des réacteurs utilisant la fission. Mais, il est possible de concevoir la fusion. Il est nécessaire de disposer d'une température extrêmement élevée (plusieurs millions de degrés). La réaction de fusion deutérium-tritium permettrait de disposer des ressources inépuisables de l'eau de mer, car le lithium est très peu abondant dans la croûte terrestre. Le principe est que, passant d'un état métas-

table à un état stable (le point final étant l'hélium) il se dégage une énergie considérable. Comme on le sait, les perfectionnements du laser ont permis d'aborder le difficile problème de la fusion soit par la méthode de la longue colonne de plasma confinée par champ magnétique avec des impulsions du laser à cadence rapide, ou par la méthode de la cible sphérique, confinée par inertie. Il nous suffit de rappeler que la fusion n'est certainement pas pour demain.

Un autre problème, en plus de la toxicité déjà signalée pour le plutonium qui existe dans la fission, se présente à propos du stockage des déchets. Le programme artisanal, qui consiste à les enfermer dans des containers en ciment que l'on immerge ensuite dans la mer en espérant qu'ils ne se déferont pas trop vite et ne pollueront pas trop la mer, n'est plus applicable lorsque l'on se trouve en présence de quantités importantes de déchets radioactifs provenant des centrales nucléaires, et que ces déchets contiennent des dizaines de tonnes qui peuvent rester radioactifs pendant des milliers d'années. Ils sont extrêmement difficiles à traiter, en raison de leur forte radioactivité, par des solvants tels que le tributylphosphate. On doit opérer avec des solutions suffisamment diluées, ce qui pose des problèmes lorsqu'il s'agit de volumes très importants avec un coût élevé d'installation. D'ailleurs les produits à supprimer varient avec le type de centrale. Les combustibles provenant des centrales à eau légère sont beaucoup plus irradiés que ceux qui proviennent des centrales graphite-gaz. Les masses de ciment des usines thermonucléaires risquent aussi de devenir radioactives. Les études et les expériences de démantèlement des centrales électronucléaires hors d'usage commencent seulement. Des normes internationales fixent les doses maximales permises pour l'air et pour l'eau.

Un autre problème, en plus de la toxicité déjà signalée, se présente à propos du stockage des déchets que l'on essaie de transformer pour rendre leur période dangereuse moins longue. Mais la multiplication des centrales nucléaires posera de graves problèmes. Il faut, dans cette même hypothèse, songer

aux énormes quantités de chaleur que l'on produira, sans pouvoir les utiliser directement à la production d'énergie. De difficiles problèmes d'environnement ne manqueront pas de se poser à bref délai. Les fleuves et la mer verront leur température passablement accrue et il faudra prendre des mesures pour modifier aussi peu que possible l'environnement. Des limitations sont déjà en service. Les graves crises sociales feraient courir plus de risques que ne le feront jamais les centrales nucléaires.

Dans ce qui précède, nous avons passé en revue des techniques variées. Un fait semble certain: la consommation d'énergie croissante, mais, de plus, sous forme de grande puissance et extrêmement localisée. D'autre part, une fourniture d'énergie, de plus en plus grande, est demandée sous forme de petite puissance, très dispersée et pouvant être de plus faible qualité.

Pour essayer de libérer l'énorme énergie, contenue dans la matière, on a souvent perdu de vue les deux principes qui régissent l'évolution des phénomènes physiques en fonction du temps, et qui expriment leur irréversibilité; le principe de l'accroissement de l'entropie, suivant Sadi Carnot, et le principe de l'accroissement de la symétrie, suivant Pierre Curie.

Comme conclusion, nous devons penser que l'adoption d'un programme d'énergie nucléaire à grande échelle conduira à disposer d'un nombre important de kilowatts, mais représente actuellement les termes d'un pari, dont on comprendra l'importance et surtout les dangers.

Ce que certains appellent le pacte avec le diable, a déjà été conclu. On a parlé aussi de l'énergie du désespoir. Cependant, le nombre de centrales n'a pas dépassé le quantum au delà duquel, la planète, aux dires des antinucléaires, deviendrait invivable. Mais personne ne décrit avec précision ce que serait une « société » nucléaire, comme, pour ses adversaires, une société non nucléaire. L'énergie nucléaire peut sûrement constituer un « relais » rentable du pétrole. Toute la question est de savoir jusqu'à quelle limite il convient de pousser ce pro-

gramme pour tâcher d'essayer d'échapper aux inconvénients que nous avons signalés.

Si l'on décidait de consacrer à l'énergie solaire des sommes aussi considérables que celles qui ont été dépensées pour l'étude des propriétés de l'atome, on se trouverait très probablement à la tête d'une énergie disponible qui ne dépend en aucune manière de la conjonction politique, en permettant de produire de la chaleur, d'obtenir de l'électricité et des combustibles pour une période de temps indéfinie, sans risques de pollution.